



①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑫ Patentschrift  
⑩ DE 195 22 072 C 1

⑤1 Int. Cl.<sup>6</sup>:  
**H 02 N 2/16**  
H 01 L 41/08

②1 Aktenzeichen: 195 22 072.2-32  
②2 Anmeldetag: 17. 6. 95  
④3 Offenlegungstag: —  
④5 Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: 6. 2. 97

DE 195 22 072 C 1

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

⑦3 Patentinhaber:  
PI Ceramic GmbH, 07589 Lederhose, DE

⑦4 Vertreter:  
R. Pfeiffer und Kollegen, 07743 Jena

⑦2 Erfinder:  
Wischnewskiy, Wladimir, Dr., 07589  
Münchenbernsdorf, DE

⑤6 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit  
in Betracht gezogene Druckschriften:

DE 42 44 074 A1  
DE 39 04 070 A1  
DE 31 34 488 A1  
US 40 19 073

FRÖSCHLE, Axel: »Analyse eines  
Piezo-Wanderwellen-motors« 1992, Dissertation  
Universität Stuttgart, Institut für Konstruktion und  
Fertigung in der Feinwerktechnik, S. 47-55;

⑤4 Piezoelektrischer Motor

⑤7 Ein piezoelektrischer Motor, der bei geringer Erregerspannung eine maximale mechanische Leistung, eine hohe Funktionssicherheit und geringe Kosten verursacht, weist einen Stator auf, dessen Oszillator in Form eines geschlossenen Wellenleiters mit mindestens einem Generator für eine elastische Wanderwelle des Wellenleiters versehen ist. Ein Rotor steht in Friktionskontakt mit einer Funktionsfläche des Oszillators. Der Generator für die elastische Wanderwelle hat eine Länge, die gleich der erzeugten Wellenlänge ist und besteht aus einem Grundgenerator und zwei Zusatzgeneratoren für elastische Longitudinalstehwellen gleicher Amplitude und Wellenlänge. Jede Stehwelle ist gegenüber der vom Grundgenerator erzeugten Welle  $\pm 1/3$  der Wellenlänge längs zum Wellenleiter versetzt. Dem Grundgenerator und den Zusatzgeneratoren sind Erregerquellen zugeordnet. Die Zusatzgeneratoren und ihre Erregerquellen sind so ausgebildet, daß die von ihnen erzeugten Stehwellen bzgl. der vom Grundgenerator erzeugten Stehwelle um  $\pm 2/3 \pi$  phasenverschoben sind. Die Länge des Wellenleiters ist gleich der Wellenlänge der Stehwelle oder einem ganzzahligen Vielfachen dieser Wellenlänge.

DE 195 22 072 C 1

Die Erfindung betrifft einen piezoelektrischen Motor gemäß dem Oberbegriff des Anspruchs wie er aus der DE 42 44 704 bekannt ist. Sie ist besonders als elektrischer Miniaturmotor für stetige oder schrittweise Drehbewegungen verwendbar. Der erfindungsgemäße Motor kann in Automatisierungssystemen, in der Robotertechnik, in Werkzeugmaschinen zur genauen Bewegung der Schneidwerkzeuge, in Kraftfahrzeugen als Fensterheber- und Scheibenwischermotor und als Antrieb für die Sitzeinstellung verwendet werden. Er kann auch in trägheitsfreien Antrieben von Fernsehantennen und anderen Vorrichtungen, in denen große Drehmomente bei relativ kleinen Drehgeschwindigkeiten erforderlich sind, angewendet werden.

Bekannt sind piezoelektrische Motoren, in denen die Umwandlung der elektrischen Energie in die Drehbewegung eines Rotors mit Hilfe piezoelektrischer Oszillatoren erfolgt, die in sich zwei Resonatoren für zwei unterschiedliche Typen von Stehwellen vereinigen, siehe u. a. US-PS 4.019.073. Bei diesen Motoren bereitet es Schwierigkeiten, die Resonanzfrequenzen der zwei unterschiedlichen Stehwellentypen sowohl über einen großen Temperaturbereich als auch bei Einwirkung von mechanischen Kräften in Übereinstimmung zu bringen.

Dieser Nachteil ist piezoelektrischen Motoren nicht zueigen, die auf dem Prinzip der Erzeugung von akustischen Wanderwellen mit Hilfe zweier gleichartiger Stehwellen beruhen, siehe z. B. Axel Fröschle Analyse eines Piezo-Wanderwellenmotors, Dissertation, Stuttgart, 1992, S. 48ff. Nachteilig ist bei diesen Motoren, daß in ihnen akustische Wellen verwendet werden und daß deshalb das die Wanderwelle erzeugende Piezoelement als dünner Ring ausgeführt ist, der auf dem metallischen Wellenleiter mit Hilfe eines elastischen organischen Klebers befestigt ist. Die Verwendung elastischer Wellen und das im Verhältnis zum Gesamtvolumen des Wellenleiters kleine Volumen des Piezoelementes bedingen einen niedrigen Wirkungsgrad der elektromechanischen Energieumwandlung. Damit erhöht sich wesentlich die Erregerspannung für den Motor. Die Verbindung des Piezoelementes mit dem metallischen Wellenleiter mittels organischer Kleber begrenzt die maximale vom Motor abgebbare mechanische Leistung, verringert seinen Wirkungsgrad und senkt die Funktionssicherheit. Das Piezoelement eines Motors für solche Wellen weist eine unterschiedlich ausgerichtete Polarisation auf, wodurch die Herstellung erschwert und der Motor verteuert wird. Das hat zur Folge, daß die piezoelektrischen Motoren mit Wanderwellen nicht mit den preiswerten elektromagnetischen Motoren konkurrieren können.

Aus der DE 42 44 704 A1 ist ein Wanderwellenmotor mit zylindrischem Schwingstator bekannt, an den transversal zur Achse der induzierten Drehbewegung gerichtete piezoelektrische Dehnkörper andrücken. Bei ihrer Erregung prägen diese Dehnkörper dem vorzugsweise aus Metall bestehenden Stator eine transversal gerichtete Wanderwelle auf, die einen mit dem Stator in Berührung stehenden Rotor in Gang setzt. Die Nachteile dieses Wanderwellenmotors sind, insbesondere bei kleinen Durchmessern des Schwingstators, seine geringe Effektivität bzw. die relativ hohen anzulegenden Spannungen, die zur Zerstörung des Motors führen können, sein hoher Fertigungsaufwand, der sich aus dem Vorhandensein von Schwingstator und Dehnkörpern ergibt.

Die DE 31 34 488 A1 beinhaltet einen Schrittmotor,

der entlang der Peripherie einer innenverzahnten Hülse eine Vielzahl von plättchenförmigen Piezoelementen zur Erregung einer transversal zur Drehachse gerichteten Wanderwellenbewegung besitzt. Abgesehen davon, daß es sich hierbei um eine Zahnradübertragung und nicht um eine Friktionsübertragung handelt, wird auch in diesem Fall ein besonderes Mittel (innenverzahnte Hülse) zusätzlich zur Bewegungsübertragung verwendet, wodurch der Fertigungsaufwand erhöht wird.

Zwei miteinander korrelierende, getrennte piezoelektrische Erreger zur Erzeugung einer kombinierten Schub-Dreh-Bewegung hat der in der DE 39 04 070 A1 offenbarte Ultraschallmotor. Zwar wird hier eine longitudinale Schwingung zur Drehachse in Form einer stehenden Welle erzeugt; nachteilig sind jedoch der große Aufwand zur Lagerung der beiden piezoelektrischen Erreger und das geringe Größenverhältnis des zur Erregung benutzten Volumens zum Gesamtvolumen des Ultraschallmotors.

Ziel der Erfindung ist die Entwicklung eines piezoelektrischen Motors, mit einem hocheffektiven Oszillator, der bei niedriger Erregerspannung eine maximale mechanische Leistung, eine hohe Funktionssicherheit und einen geringen Preis ermöglicht.

Es soll ein piezoelektrischer Motor geschaffen werden, bei dem auf Grund der Erzeugung von akustischen Longitudinalwellen gleicher Amplitude in einem monolithischen piezoelektrischen Oszillator eine Wanderwelle zum Entstehen gebracht wird, die sich in einem Kreis auf einer Friktionsfläche des Oszillators bewegt und dabei ständig und elastisch Kontakt mit einem Rotor hält und auf Grund der sich auf einer geschlossenen Bahn bewegenden Punkte der Oszillatoroberfläche ein Drehmoment an den Rotor weitergibt.

Die gestellte Aufgabe wird durch die kennzeichnenden Merkmale des ersten Patentanspruchs gelöst. Da das maximal mögliche Volumen des Oszillators des erfindungsgemäßen Motors aus einem piezoelektrischen Material, vorzugsweise Keramik, gefertigt ist und für die Erzeugung von akustischen Wellen verwendet wird, verfügt der Motor über den maximal möglichen effektiven elektromechanischen Koeffizienten. Dies senkt wesentlich die Anregungsspannung. Außerdem erfolgt in der vorgeschlagenen Konstruktion kein Verkleben des Piezoelementes mit dem Wellenleiter mittels eines Klebers, der vorzugsweise aus organischen Komponenten besteht. Dies ermöglicht maximale mechanische Spannungen im Oszillator des Motors, die nur durch die Festigkeit der Keramik beschränkt werden und damit maximale mechanische Leistungen. Das Piezoelement des erfindungsgemäßen Motors ist in einer Richtung gleichgerichtet polarisiert, was seine Herstellung gegenüber vergleichbaren elektromagnetischen Motoren vereinfacht und kostengünstiger gestaltet.

Die vorliegende Erfindung kann in unterschiedlichen Varianten realisiert werden. So kann z. B. der geschlossene Wellenleiter vorteilhaft als zylindrischer, aus Piezokeramik gefertigter Körper ausgeführt sein, wobei die Stehwellengeneratoren als Abschnitte paralleler Elektroden auf der Innen- und Außenfläche des Zylinders ausgebildet sind. In dieser Ausführungsvariante stellt das gesamte Oszillatorvolumen das piezoelektrisch aktive Medium dar, und ein solcher Motor besitzt einen maximal möglichen elektromechanischen Koeffizienten. In diesem Fall ist die elektrische Erregerspannung für den Motor minimal. Auch können drei auf einer Oberfläche des Wellenleiters nebeneinander befindliche Elektroden mit einer auf der entgegengesetz-

ten Oberfläche entsprechend liegenden Elektrode einen Grund- und zwei Zusatzgeneratoren bilden. In diesem Fall genügt die Anordnung eines Grund- und Zusatzgenerators umfassenden Generators, dessen periphere Länge gleich der Länge oder einem ganzzahligen Vielfachen der Länge der Longitudinalwellen ist. Da in der Konstruktion des Oszillators keine Klebeverbindung mit organischen Kleber vorgesehen ist, können im Oszillator maximal zulässige mechanische Spannungen erzeugt werden, die nur durch die Materialfestigkeit des Wellenleiters begrenzt sind. Das ergibt maximale Schwingungsbewegungen der Punkte der Funktionsfläche des Oszillators, was wiederum eine maximale mechanische Leistung an der Motorwelle bewirkt. Das Fehlen von Klebestellen mit organischem Kleber verringert die mechanischen Verluste im Oszillator des Motors und erhöht dadurch den Wirkungsgrad. Außerdem wird dadurch die Funktionssicherheit des Motors erhöht, da eine Zerstörung von Klebstellen bei einem hohen Anregungspegel ausgeschlossen ist.

In einer anderen vorteilhaften Ausführungsvariante hat der geschlossene Wellenleiter die Form eines passiven zylinderförmigen Körpers aus Metall oder Keramik, und die Stehwellengeneratoren bestehen aus Paketen von piezoelektrischen Wandlern. Dabei kann der Oszillator für den Motor beliebige Abmessungen aufweisen. Die Abmessungen werden nicht durch die technologischen Herstellungsmöglichkeiten der piezoelektrischen Zylinder beschränkt. Das ermöglicht den Bau von piezoelektrischen Leistungsmotoren mit einigen Kilowatt Leistung.

Erfindungsgemäß kann die Funktionsfläche des Oszillators vorteilhaft mit einer dünnen verschleißfesten Friktionsschicht versehen sein, die in Kontakt mit dem Rotor tritt. In dieser Ausführungsvariante können mittels der Friktionsschicht die Friktionskennwerte für die Funktionsfläche des Oszillators vorgegeben werden, was eine Erhöhung des Drehmomentes des Motors bewirkt.

In einer der Ausführungsvarianten der Erfindung kann die Friktionsschicht vollständig aus einem eine chemische Verbindung mit der piezoelektrischen Keramik bildenden Material, z. B. Glas, Metall oder ein anderer Werkstoffe gefertigt werden. Ein Motor, bei dem die Friktionsschicht eine chemische Verbindung mit dem Oszillator bildet, funktioniert an der Verbindungsstelle zerstörungsfrei bis zu der im Oszillator maximal zulässigen mechanischen Spannung. Bei einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform besteht die Friktionsschicht aus einer Grund- und einer Zwischenschicht. Die Grundschicht bestimmt die Friktionseigenschaften und die Zwischenschicht bildet eine chemische Verbindung mit dem Piezomaterial. Eine solche Ausführungsvariante ermöglicht eine bedeutende Erweiterung der Anzahl der einsetzbaren Friktionswerkstoffe. In der folgenden Ausführungsvariante kann die Friktionsschicht aus einer Materialmischung bestehen, deren Grundlage ein Material bildet, das eine chemische Verbindung mit der Piezokeramik eingeht, und als Füllstoff ein Material verwendet, das den Reibungskoeffizienten der Friktionsschicht erhöht. In dieser Ausführungsvariante kann der notwendige Wellenwiderstand der Friktionsschicht durch Ändern des Verhältnisses der eingesetzten Werkstoffe ausgewählt werden. In einer anderen Ausführungsvariante kann die Friktionsschicht aus einem porösen Material mit hohen Reibungskoeffizienten und hoher mechanischer Festigkeit gefertigt werden, wobei die Poren dieses Werkstoffes mit einem Material aufgefüllt werden können, das eine chemische Verbindung mit der

Piezokeramik bildet. Auf diese Weise lassen sich besonders feste, eine lange Funktionsdauer des Motors im Schrittbetrieb gewährleistende Friktionsschichten herstellen.

Zur elektrischen Verschaltung des erfindungsgemäßen piezoelektrischen Motors können vorteilhaft Leistungsverstärker verwendet werden, die über eine Phasenschieberkette mit der Erregerquelle des Grundgenerators verbunden sind, die Erregerquellen der Zusatzgeneratoren darstellen. In dieser Variante ist eine gute Abstimmung aller Generatoren sowohl in einem großen Temperatur als auch einem mechanischen Belastungsbereich möglich, was die Betriebsstabilität des erfindungsgemäßen Motors verbessert. Außerdem ist vorteilhaft eine Ausführungsvariante möglich, in dem die Erregerquellen der Zusatzgeneratoren mit Vorrichtungen zur Umpolung des Phasenwinkels des Signals ausgestattet sind. Dies ermöglicht die Umkehrung der Drehrichtung des Rotors. Erfindungsgemäß kann auch die Erregerquelle des Grundgenerators durch einen frequenzgesteuerten Spannungsgenerator mit einem Steuereingang für die Frequenz gebildet werden. Eine solche Variante ermöglicht eine gleichmäßige Regelung der Rotordrehfrequenz durch Ändern der Frequenz der Erregerquelle des Grundgenerators.

In einer weiteren Varianten kann der piezoelektrische Motor so ausgeführt sein, daß der Grundgenerator für Stehwellen und seine Erregerquelle eine positive Rückkopplung aufweisen und sie zusammen einen elektromechanischen Autogenerator bilden. Dabei befindet sich die Frequenz der Stehwellengeneratoren immer im Bereich der Oszillatorresonanzfrequenz, wodurch die Stabilität der Drehfrequenz des Rotors erhöht wird.

In einer Ausführungsvariante des erfindungsgemäßen Motors kann der positive Rückkopplungszweig mit einem Impedanzelement verbunden sein, das wiederum in Reihe mit dem Grundgenerator für Stehwellen geschaltet ist. Auch ist es möglich, den positiven Rückkopplungszweig mit einem Stromwandler zu verbinden, der in Reihe mit dem Grundgenerator für Stehwellen geschaltet ist.

Schließlich kann der positive Rückkopplungszweig mit der Rückkopplungselektrode verbunden sein, die, bedingt durch die vom Hauptgenerator erzeugten Stehwellen, am Ort des Auftretens der maximalen mechanischen Spannungen angeordnet ist.

Die letztgenannten drei Varianten gewährleisten eine sichere Erregung des elektromechanischen Generators bei der Oszillatorresonanzfrequenz. Eine weitere vorteilhafte Gestaltung des Motors ist mit einem elektronischen Schalter zur Unterbrechung des positiven Rückkopplungszweiges ausgestattet. In diesem Fall ist ein Schrittmotor leicht realisierbar, was die Anwendung als Schrittmotor ermöglicht.

Weitere Merkmale der Erfindung ergeben sich aus der folgenden Figurenbeschreibung. Anhand der schematischen Zeichnung wird die Erfindung an 34 Ausführungsbeispielen näher erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 die erfindungswesentlichen Teile eines erfindungsgemäßen Motors in perspektivischer Darstellung,  
Fig. 2 einen Oszillator in abgewickelter Darstellung,  
Fig. 3 Diagramme der Erregerspannungen,  
Fig. 4 eine stehwellenartige Verformung eines erfindungsgemäßen Oszillators bei angelegter Erregerspannung,

Fig. 5 ein Diagramm einer Erregerspannung,  
Fig. 6 einen Augenblickszustand der Funktionsfläche des Oszillators bei Erzeugung einer Stehwelle,

Fig. 7 Diagramme zur Darstellung des Überlagerungsprozesses bei Verformung der Funktionsfläche,

Fig. 8 ein vollständiges Bild des Bewegungsablaufs von Punkten der Funktionsfläche des Oszillators bei Erzeugung einer Stehwelle,

Fig. 9 eine Darstellung zur Herausbildung der Bewegungsbahn eines Punktes mit der Funktionsfläche des Oszillators,

Fig. 10 eine Darstellung der Phasenbewegung von Punkten der Funktionsfläche des Oszillators,

Fig. 11 mögliche Bewegungslinien von Punkten der Funktionsfläche,

Fig. 12 ein Elementarvolumen eines Oszillators und sein Ersatzschaltbild,

Fig. 13 ein vollständiges Ersatzschaltbild des erfindungsgemäßen Oszillators,

Fig. 14 ein vereinfachtes Ersatzschaltbild dieses Oszillators,

Fig. 15 elektromechanische Kennwerte des erfindungsgemäßen Motors,

Fig. 16 verschiedene Oszillatorformen,

Fig. 17 Varianten verschleißfester Schichten,

Fig. 18 Varianten für die Elektroden,

Fig. 19 eine besondere Elektrodenanordnung,

Fig. 20 eine unsymmetrische Wanderwelle,

Fig. 21 Blockschaltbilder zur Erläuterung des Grundprinzips der Oszillatoransteuerung,

Fig. 22 ein Blockschaltbild zur Selbsterregung des Oszillators,

Fig. 23 ein Blockschaltbild mit frequenzgesteuerten Autogeneratoren,

Fig. 24 ein Blockschaltbild einer elektromechanischen Autogenerator darstellenden Anordnung,

Fig. 25 ein Blockschaltbild eines Stromwandlers,

Fig. 26 eine Rückkopplungselektrode und ihre Wirkungsweise,

Fig. 27 ein Blockschaltbild mit Rückkopplungselektrode,

Fig. 28 ein Blockschaltbild des Schrittmotors,

Fig. 29 eine Motorkonstruktion mit langgezogenem Oszillator im Längsschnitt,

Fig. 30 eine Draufsicht auf den Oszillator gemäß Fig. 29,

Fig. 31 eine Motorkonstruktion mit Ringoszillator,

Fig. 32 eine Motorkonstruktion mit gestauchtem Gehäuse in Schnittdarstellung,

Fig. 33 eine Ansicht von Fig. 32,

Fig. 34 eine Motorkonstruktion mit Paketwandlern in einem Axialschnitt A-A der Fig. 35,

Fig. 35 eine Draufsicht von Fig. 34,

Fig. 36 eine Motorkonstruktion mit Magnetring in einem Axialschnitt,

Fig. 37 eine Prinzipschaltung mit frequenzgesteuertem Autogenerator,

Fig. 38 eine erste Motorschaltung als elektromechanischer Autogenerator,

Fig. 39 eine zweite Motorschaltung als elektromechanischer Autogenerator und

Fig. 40 eine Prinzipschaltung eines erfindungsgemäßen Motors als Schrittmotor.

Der erfindungsgemäße piezoelektrische Motor enthält gemäß Fig. 1 einen Stator 1 mit einem zylindrischen Oszillator 2 in Form eines geschlossenen und aus piezoelektrischer Keramik gefertigten Wellenleiters 3. Der Wellenleiter 3 besitzt mindestens einen Generator 4 für eine elastische Wanderwelle im Körper des Wellenleiters 3. Ein Rotor 6 wird in der dargestellten Ausführungsform durch sein Eigengewicht an eine Stirnfläche

(Funktionsfläche) 5 des Oszillators 2 angepreßt. Eine zweite nicht als Funktionsfläche dienende Stirnfläche 7 des Oszillators 2 stützt sich auf einer elastischen schallsolierenden Unterlage 8 ab, die im nicht dargestellten Gerätegehäuse angeordnet ist. Der Wanderwellengenerator 4 umfaßt einen Grundgenerator 9 und zwei Zusatzgeneratoren 10, 11 für Stehwellen. Jeder der Generatoren 9, 10, 11 belegt einen gleichgroßen Abschnitt 12, 13, 14 des zylinderförmigen Wellenleiters 3 und wird aus zwei parallelen Elektroden 15, 16 mit zwischen ihnen befindlicher piezoelektrischer Keramik gebildet. Jede der Elektroden 15, 16 stellt eine in Längsrichtung auf den zylinderförmigen Wellenleiter 3 aufgetragene stromleitende metallische Schicht dar. Zur Aktivierung der Generatoren 9, 10, 11 ist die piezoelektrische Keramik zwischen den Elektroden 15, 16 in Normalenrichtung zu diesen Elektroden polarisiert. In Fig. 1 und in den folgenden ist die Polarisation mit Pfeilen 150 dargestellt.

Jeder der Stehwellengeneratoren 9, 10, 11 hat eine Erregerquelle 17, 18, 19. Die Anschlüsse 20, 21 jeder Erregerquelle 17, 18, 19 sind mit den Elektroden 15 und 16 der entsprechenden Generatoren 9, 10, 11 verbunden. An den Anschlüssen 20, 21 und damit an den Elektroden 15, 16 der Stehwellengeneratoren 9, 10, 11 liegen die entsprechenden Spannungen  $U_1 = U \cdot \sin \omega t$ ,  $U_2 = U \cdot \sin(\omega t \pm 120^\circ)$ ,  $U_3 = U \cdot \sin(\omega t \pm 120^\circ)$  an.

In Fig. 2 ist ein abgewickelter zylinderförmiger Wellenleiter 3 mit der Höhe  $h$  und der Breite  $b$  dargestellt. Die Länge des Wellenleiters 3 entlang der Mittellinie 22 muß ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge  $\lambda$  betragen, die im Wellenleiter durch die Stehwellengeneratoren für 9, 10, 11 erzeugt wird. Die Länge jedes Stehwellengenerators 9, 10, 11 längs der Mittellinie 22 beträgt  $\lambda/3$ . Die Zusatzgeneratoren 10, 11 sind, bezogen auf den Grundgenerator 9, längs der Mittellinie 22 um den entsprechenden Betrag von  $\pm \lambda/3$  verschoben. Jede Gruppe von drei Stehwellengeneratoren 9, 10, 11 bildet einen Wanderwellengenerator 4. Der dabei von einem Wanderwellengenerator 4 eingenommene Platz längs der Mittellinie des zylindrischen Wellenleiters 3 ist gleich der Wellenlänge  $\lambda$ . Die Zahl der Generatoren 4 ist frei wählbar und hängt von der Länge der Mittellinie 22 des zylindrischen Wellenleiters 3 ab. Der in Fig. 2 dargestellte Wellenleiter 3 hat fünf Wanderwellengeneratoren. Alle fünf Generatoren 4 sind elektrisch parallel geschaltet. Eine solche Schaltung bedeutet, daß der Anschluß 20 jeder der Erregerquellen 17, 18, 19 mit der entsprechenden Elektrode 15 der Generatoren 9, 10, 11 entsprechend verbunden ist. In Fig. 2 sind die Anschlüsse 21 der Erregerquellen 17, 18, 19 miteinander verbunden und an die Elektrode 16, die die gemeinsame Elektrode für die Generatoren 9, 10, 11 bildet, angeschlossen. Durch die Erregerquellen 17, 18, 19 werden sinusförmige Spannungen gleicher Amplitude und Frequenz, die zueinander phasenverschoben sind, bereitgestellt. Die Phasenverschiebung der elektrischen Spannungen der Erregerquellen 18, 19 bezogen auf die Spannung der Erregerquelle 17 beträgt  $\pm 2/3 \pi (\pm 120^\circ)$ .

Fig. 3 zeigt die Diagramme der Spannungsverläufe. Die Spannung  $U_1$  wird durch die Erregerquelle 17, die Spannung  $U_2$  durch die Erregerquelle 18, die Spannung  $U_3$  durch die Erregerquelle 19 bereitgestellt.

In Fig. 4 ist eine Longitudinalstehwelle im Wellenleiter 3 und damit seiner Funktionsfläche 5 dargestellt, die durch einen der Generatoren 9, 10, 11 erzeugt wird, wobei dieser Generator mit einer sinusförmigen Spannung  $U_i = U \cdot \sin \omega t$  der entsprechenden Erregerquelle

17, 18, 19 angeregt wurde. Der in Fig. 4 dargestellte Wellenleiter 3 besitzt acht parallel geschaltete gleiche Stehwellengeneratoren 9, 10 oder 11. Diese Generatoren erzeugen eine Stehwelle mit sechzehn Maxima bzw. Minima. Die Anzahl gleicher Generatoren 9, 10, 11 wird durch die Zahl der Wanderwellengeneratoren 4 bestimmt. In dieser Variante des Wellenleiters 3 müssen es acht sein.

Während des Betriebs des erfindungsgemäßen Motors werden durch die Stehwellengeneratoren 9, 10, 11 unabhängig drei Stehwellen gleicher Amplitude und Wellenlänge erzeugt, die im Raum längs der Mittellinie 22 (Fig. 2) des Wellenleiters 3 zueinander um  $\lambda/3$  verschoben sind. Die Phasen dieser Wellen unterscheiden sich voneinander um den Betrag von  $\pm 2/3\pi$  ( $\pm 120^\circ$ ).

Im folgenden werden die grundsätzlichen Funktionen des erfindungsgemäßen piezoelektrischen Motors anhand der Fig. 1 bis 15 näher beschrieben.

An jeden Stehwellengenerator 9, 10, 11 (Fig. 1 und 2) wird die von der entsprechenden Erregerquelle 17, 18, 19 bereitgestellte Erregerspannung  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$  (Fig. 3) angelegt. Jede Spannung steuert den entsprechenden Generator 9, 10, 11. Diese Generatoren erzeugen im Wellenleiter 3 des Oszillators 2 drei identische Longitudinalstehwellen gleicher Amplitude, die im Raum, bezogen auf die Mittellinie 22 des Wellenleiters, zueinander um den Betrag  $\pm \lambda/3$  und bezogen auf die Zeit (Phase) um den Winkel  $\pm 2/3\pi$  ( $\pm 120^\circ$ ) verschoben sind. In Fig. 4 ist eine dieser Wellen dargestellt. Da die Schwingungsamplitude des Oszillators 2 2 bis 10  $\mu\text{m}$  im Verhältnis zu seinen Abmessungen 20 bis 100 mm beträgt, wird jede Welle unabhängig von anderen erzeugt. Sie existieren unabhängig voneinander und verformen unabhängig voneinander die Funktionsfläche 5 des Oszillators 2. Die Verschiebung der Punkte des Oszillators 2 im wesentlichen rechtwinklig zur Funktionsfläche 5 ändert sich durch das Einwirken jeder einzelnen Welle nach einem Sinusgesetz, so daß auch die Verschiebung der Punkte der Funktionsfläche 5 nach diesem Gesetz und entsprechend der Änderung der sinusförmigen Erregerspannung erfolgt.

Fig. 5 zeigt das Diagramm der Spannungsverläufe eines der Stehwellengeneratoren 9, 10, 11 für den angegebenen Zeitabschnitt  $t_0$ - $t_5$  einer Schwingungsperiode. Fig. 6 zeigt die Phasen der Bewegung der Funktionsfläche 5 des Oszillators 2 für die Zeitabschnitte  $t_0$ - $t_5$ . In den Diagrammen sind die sich in den Extremwerten der Transversalgeschwindigkeiten der Stehwellen befindlichen Punkte  $a_0$  der Funktionsfläche 5 gekennzeichnet. Diese Punkte führen Schwingungen auf senkrecht zur Funktionsfläche 5 verlaufenden geraden Linien (strichliniert gezeichnet) aus. Werden gleichzeitig drei Stehwellen im Oszillator 2 erzeugt, überlagern sie sich. Die durch die Stehwellen hervorgerufenen Verformungen des Oszillatorkörpers summieren sich ebenso wie die Verformungen der Funktionsfläche 5.

In Fig. 7 ist der Überlagerungsvorgang zur Verformung der Funktionsfläche 5 dargestellt. Die Angaben der Positionen 23, 24, 25 entsprechen den Zeitpunkten  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  der Augenblickswerte der Erregerspannungen  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$  an den Generatoren 9, 10, 11 (Fig. 3). In Fig. 7 ist durch die gerissene Linien 26, 27, 28 der durch jede Stehwelle hervorgerufene Verformungszustand der Funktionsfläche 5 dargestellt. Mit der durchgehenden Linie 29 ist die überlagerte Verformung der Funktionsfläche 5 gekennzeichnet. Aus den Diagrammen 23, 24, 25 (Fig. 7) ist erkennbar, daß die überlagerte Verformung der Funktionsfläche 5 des Oszillators 2 eine sich weiterbe-

wegende Welle 29 (Wanderwelle) des Oszillators 2 darstellt. Diese Welle 29 legt in einer Schwingungsperiode einen Weg zurück, der gleich der Wellenlänge  $\lambda$  der Stehwelle ist. Die Amplitude der Wanderwelle ist gleich dem 1,5fachen Amplitudenwert einer der Stehwellen.

Fig. 8 zeigt den vollständigen Bewegungsablauf der Punkte  $a_1$ - $a_5$  der Funktionsfläche 5 im Bereich der Wellenlänge des Wellenleiters 3 (Oszillator 2), der bei Erzeugung einer Stehwelle im Oszillator 2 gleich  $\lambda/2$  ist. Der Bewegungslinie der Punkte  $a_1$ - $a_5$  (Fig. 8) ist durch gekrümmte gerissene Linien dargestellt. Der Wellenleiter 3 (Oszillator 2) dehnt sich abwechselnd aus (Punkte  $\pm a_1'$ , bis  $\pm a_5'$ ) und preßt sich in seinen Schwingungsbäuchen (Punkte  $\pm a_1''$  bis  $\pm a_5''$ ) zusammen. Der zylinderförmige Wellenleiter 3 des Oszillators 2 stellt einen elastischen Körper mit endlichen Abmessungen dar, dessen Elementarteilchen mittels Elastizitätskräften zusammengehalten werden. Dies hat zur Folge, daß bei der Erregung einer Longitudinalstehwelle, die Punkte des Wellenleiters 3 (Oszillator 2) sich, wie in Fig. 8 dargestellt, auf geneigten Bahnen bewegen, wobei sie sich abwechselnd einander annähern bzw. voneinander entfernen. Nur die sich in den Extremwerten befindlichen Punkte bewegen sich (schwingen) auf geraden senkrecht zur Oberfläche des zylinderförmigen Wellenleiters 3 verlaufenden Bahnen (siehe Fig. 6 und 8). Diese Punkte besitzen eine maximale Queramplitude  $\Delta y_{\text{max}}$ . Die restlichen Punkte bewegen sich auf geraden und bei größeren Amplituden auf gekrümmten und geneigt zur Oberfläche des Wellenleiters verlaufenden Bahnen, wie in Fig. 8 dargestellt. Mit zunehmender Entfernung vom zentralen Punkt  $a_0$  verringert sich ihre Queramplitude (in y-Richtung). Dies erklärt, warum jeder sich in einer gewissen Entfernung vom Punkt  $a_0$  (Linie) des Maximums befindliche Punkt  $a_n$  der Funktionsfläche 5, eine Quer- und eine Längskomponente der Geschwindigkeit aufweist. Wobei mit Zunahme der Entfernung (Punkte  $+a_n$  und  $-a_n$ ) beiderseits des zentralen Punktes  $a_0$  die Längskomponente (x-Richtung) der Geschwindigkeit sich erhöht und bei einer Entfernung von  $\pm \lambda/4$  die Queramplitude seinen Maximalwert von  $\Delta x_{\text{max}}$  erreicht. Die Querkomponente  $\Delta y$  ist in diesem Punkt minimal. Der nichtlineare Bewegungsverlauf (Krümmung) ist durch Inhomogenitäten des Wellenleitermaterials bei großen Schwingungsamplituden bedingt, was praktisch immer auftritt.

Bei Erzeugung einer Wanderwelle im Wellenleiter 3 des Oszillators 2 (in Fig. 9 ist die Bewegungsrichtung der Welle durch einen Pfeil 151 angegeben) durchläuft jeder Punkt der Funktionsfläche 5 des Oszillators 2 nacheinander die Positionen aller Punkte von  $+a_n'$  bis  $-a_n'$  und von  $-a_n''$  bis  $+a_n''$  und bewegt sich dabei auf einer geschlossenen Bahn, die im allgemeinen eine Ellipse und im Spezialfall einen Kreis darstellt.

Die maximale Höhe der Ellipse ist gleich der doppelten maximalen Queramplitude  $\Delta y_{\text{max}}$ . Die maximale Breite der Ellipse ist gleich der doppelten maximalen Längsamplitude  $\Delta x_{\text{max}}$ . Der Phasenwinkel zwischen Längs- und Querkomponente beträgt immer  $90^\circ$ . Wenn die Querkomponente  $\Delta y$  gleich Null ist, erreicht die Längskomponente  $\Delta x$  ihr Maximum und wenn die Längskomponente  $\Delta x$  Maximum hat, ist die Querkomponente  $\Delta y$  praktisch gleich Null.

Jeder Punkt  $a_n$  der Funktionsfläche 5 besitzt einen sich vom Punkt  $a_{n\pm 1}$  unterscheidenden anderen Bewegungsablauf auf seiner elliptischen Bahn. Fig. 10 gibt den Bewegungsablauf der Punkte der Funktionsfläche 5 wieder. Aus Fig. 10 ist erkennbar, daß die sich zum an-

gegebenen Zeitpunkt im Wellenberg befindlichen Punkte  $a_0$  Kontakt mit dem Rotor 6 haben. Auf Grund der Reibungskräfte übertragen diese Punkte der Funktionsfläche 5 ein Drehmoment auf den Rotor 6. Das Material des Rotors weist eine gewisse feststehende Verformbarkeit auf, so daß dieser Kontakt in der Praxis über eine gewisse Fläche erfolgt, die von den elastischen Materialeigenschaften des Rotors sind von der Federkraft abhängt, die den Rotor 6 an die Funktionsfläche 5 des Oszillators 2 preßt. In der Realität hat also eine gewisse Anzahl sich auf dem Wellenberg der Wanderwelle befindlicher Punkte (Flächenelemente) Kontakt mit dem Rotor und übertragen ihm ein Drehmoment. Die sich in den Wellentälern befindenden Punkte bewegen sich dabei in umgekehrter Richtung. Jeder Punkt der Funktionsfläche 5 durchläuft im Verlauf einer Schwingungsperiode einmal seine Bewegungsbahn. Die Zahl der den Rotor 6 kontaktierenden Teilflächen der Funktionsfläche 5 ist gleich der Zahl der Wellenlängen  $\lambda$ , die der Länge der Mittellinie 22 des Oszillators 2 entsprechen.

Die Drehrichtung der Ellipse oder die Bewegungsrichtung der Punkte, die Kontakt zum Rotor haben, hängt davon ab, ob die Punkte in den Wellenbergen der Stehwelle im Moment des Ausdehnens des Oszillatorwerkstoffes (Fig. 8) sich voneinander entfernen oder sich aufeinander zu bewegen. Wenn sich die Punkte voneinander entfernen, drehen sich die Ellipse und der Rotor entgegengesetzt zur Ausbreitungsrichtung der Wanderwelle.

Wenn die Punkte sich aufeinanderzubewegen, fallen die Drehrichtung von Ellipse und Rotor mit der Ausbreitungsrichtung der Wanderwelle zusammen. Dieser Fall wird hier nicht betrachtet. Er kann nur durch spezielle, z. B. konische Wellenleiterformen, realisiert werden. Das Verhältnis von Längs- zur Querkomponente  $\Delta x/\Delta y$ , d. h. der Bewegungsablauf des erfindungsgemäßen Motor wird hauptsächlich durch das Verhältnis der Wellenlänge  $\lambda$  zur Höhe des Wellenleiters  $h$  bestimmt. Je größer dieses Verhältnis, um so mehr ist die Ellipse längs der Funktionsfläche 5 gedehnt. Je kleiner dieses Verhältnis, desto mehr nähert sich die Bewegungsbahn der Punkte an die einer Kreisbahn an.

Die Oszillatorbreite (Wellenleiter) und die Elastizitätseigenschaften des Oszillatormaterials haben nur einen geringen Einfluß auf das Verhältnis der Komponenten  $\Delta x/\Delta y$ . Bei Motoren, bei denen die Bewegungsbahn der Punkte der Funktionsflächen 5 sich einer Kreisform annähert, beträgt das Verhältnis von Wellenlänge  $\lambda$  zur Oszillatorhöhe  $h$  rund 2.

Fig. 11 stellt mögliche Bewegungsbahnen von Punkten der Funktionsfläche 5 dar, und zwar zeigen Position 30 eine senkrecht zur Arbeitsoberfläche 5 langgezogene Ellipse, Position 31 eine Bewegungsbahn in Kreisform, Position 32 eine in Richtung der Funktionsfläche 5 langgezogene Ellipse mit einem Achsenverhältnis von 1,5 und Position 33 eine Ellipse mit einem Achsenverhältnis von 4. Optimal für die Funktion des erfindungsgemäßen Motors ist eine Bewegungsbahn in Form einer in Richtung der Funktionsfläche 5 angezogenen Ellipse und mit einem Verhältnis der Komponenten im Bereich von 2 bis 5 (Positionen 33 in Fig. 11). In diesem Fall ist der tangential zur Funktionsfläche 5 ausgerichtete Energiefluß um 4 bis 25mal größer als der senkrecht zu dieser Oberfläche ausgerichtete Energiefluß. Das heißt, daß der größere Teil der Statorenenergie potentiell in Rotorenergie umgewandelt wird.

Die Bewegungsbahn als Kreis (Position 31 in Fig. 11) stellt einen Grenzfall dar. Im Fall der senkrecht zur

Funktionsfläche 5 (Position 30, Fig. 11) langgezogenen Ellipse dringt ein Großteil der Energie des Stators 2 in den Rotor 6 des Motors ein, erregt ihn und wird dort in Wärme umgesetzt. Deshalb ist eine solche Bewegungsbahn unerwünscht. Im Fall einer senkrecht zur Richtung der Funktionsfläche 5 extrem langgezogenen Ellipse (nicht dargestellt) wäre die senkrecht zur Rotoroberfläche gerichtete Energie für einen Friktionskontakt von Oszillator 2 mit Rotor 6 nicht ausreichend. Bei solchen Motoren würde ein großer Teil der Energie als Wärme u. a. im Oszillator 2 freigesetzt werden. Deshalb hat im erfindungsgemäßen Motor der Oszillator 2 optimale Abmessungen, die durch die Bewegungsbahnen der Punkte vorgegeben sind. Diese Abmessungen werden durch das Verhältnis von Länge der erzeugten Stehwelle  $\lambda$  zur Höhe  $h$  des Oszillators 2 (Wellenleiter 3) bestimmt. Der genaue Wert des optimalen Verhältnisses hängt von den Elastizitätseigenschaften des Oszillatormaterials 2 und von seiner Breite  $b$  ab und befindet sich im Bereich von  $\lambda$  bis  $0,25 \lambda$ .

Unabhängig voneinander erzeugen die Stehwellengeneratoren 9, 10, 11 im Oszillator 3 akustische Stehwellen, so daß jeder dieser Generatoren als ein unabhängiges elektromechanisches Schwingungssystem betrachtet werden kann. Deshalb kann man für jeden der Generatoren 9, 10, 11 auf dem Oszillator 2 ein Elementarvolumen der Länge  $\lambda$  mit einem Stehwellengenerator, wie in Fig. 12, Position 34 gezeigt, herauslösen. Ein solches Volumen kann als elementares unabhängiges Schwingungssystem der Länge  $\lambda$  mit Elektroden der Länge  $\lambda/2$ , d. h. als ein zweimodiger piezoelektrischer Resonator betrachtet werden (Fig. 12, Position 35). Das elektrische Ersatzschaltbild eines solchen Resonators ist in Fig. 12, Position 36 dargestellt. Die Schaltung enthält folgende Bauteile:

— eine statische Kapazität

$$C_0 = s/b \cdot \epsilon_{33}^T (1 - K_{31}^2),$$

wobei  $s$  die Fläche der Elektroden bedeutet.

— einen idealen elektromechanischen Wandler mit einem Wandlungskoeffizienten von

$$N_p = b/2 \cdot d_{31}/S_{11}^E$$

— eine mechanische Kapazität

$$C_M = \lambda/\pi^2 \cdot S_{11}^E/b \cdot h$$

— eine mechanische Induktivität

$L_M = m$ , wobei  $m$  die Masse des Elementarvolumens darstellt.

— einen Widerstand für die mechanischen Verluste im Oszillator

$$R_M = \omega L_M / \theta_{eG},$$

wobei  $\theta_{eG}$  die effektive Güte des Motors darstellt.

Das vollständige Ersatzschaltbild eines Wanderwellengenerators 4 kann als eine Einheit von drei identischen Ersatzschaltbildern 37, 38, 39 (Fig. 13) der drei Stehwellengeneratoren 9, 10, 11 betrachtet werden. In der vollständigen Schaltung ist jedes der Ersatzschaltbilder 37, 38, 39 mit seiner Erregerquelle 17, 18, 19 ver-

bunden. Der Ausgang jedes der Ersatzschaltbilder 37, 38, 39 ist mit dem Friktionswandler 40 verbunden. Der im kompletten Ersatzschaltbild angegebene Friktionswandler 40 spiegelt den Friktionskontakt des erfindungsgemäßen piezoelektrischen Motors wieder. Er enthält einen Widerstand für die Reibungsverluste im Friktionskontakt  $R_F$  und einen idealen Wandler, der die Schwingungsbewegung des Oszillators 2 in eine Drehbewegung des Rotors 6 umwandelt, wobei für den Transformationskoeffizienten gilt:

$N_F = M/F \sim$ , mit  $M$  für das konstante Drehmoment  
 $F \sim$  für eine veränderliche Kraft.

Der Ausgang des Friktionswandlers 40 ist mit dem Widerstand der mechanischen Last  $R_L$  verbunden.

Das in Fig. 13 dargestellte Bild kann bei Annahme, daß der piezoelektrische Motor bei der mechanischen Resonanzfrequenz des Oszillators 2 arbeitet, in ein einfacheres Ersatzschaltbild (Fig. 14) umgewandelt werden. In diesem Ersatzschaltbild sind die Parameter  $U_1'$ ,  $U_2'$ ,  $U_3'$ ,  $R_M'$ ,  $R_F'$  auf die mechanische Seite der Schaltung gemäß Fig. 13 überführt worden.

Der erfindungsgemäße Motor weist die klassischen elektromechanischen Eigenschaften von piezoelektrischen Motoren auf. In den praktischen Ausführungen ist der Widerstand  $R_M$  für die mechanischen Verluste im Oszillator immer bedeutend kleiner als der Blindwiderstand des Oszillators  $\omega L_M$ . Deshalb hat die Frequenzabhängigkeit des Motors die in Fig. 15, Positionen 41, 42, 43 gezeigte Form. Position 41 stellt die Abhängigkeit der Drehfrequenz  $\eta$  von der Erregerfrequenz  $f$ , Position 42 die Abhängigkeit des Phasenstroms  $I_F$  (Strom eines der Stehwellengeneratoren 9, 10, 11) von der Erregerfrequenz  $f$  und Position 43 die Abhängigkeit der Phasenverschiebung  $\phi$  von der Erregerspannung  $U_1$  ( $U_2$ ,  $U_3$ ) und vom Phasenstrom  $I_F$  dar.

Alle Kennwerte nach 41, 42, 43 sind über charakteristische Punkte miteinander verknüpft. So entspricht das Maximum der Drehfrequenz  $\eta_{\max}$  der mechanischen Resonanzfrequenz des Oszillators  $f_0(\omega_0)$ . Dieser Frequenz entspricht eine Nullphasenverschiebung (Position 43) zwischen Eingangsspannung  $U_1$  ( $U_2$ ,  $U_3$ ) und Eingangsstrom  $I_F$  von jeder der Phasen. Das Strommaximum  $I_{F\max}$  der Phase befindet sich bei der Frequenz  $f_{\max}$ , welche sich links von der mechanischen Resonanzfrequenz  $f_0$  befindet. Die Stromabhängigkeit 42 weist bei der Anti-Resonanzfrequenz des Oszillators  $f_a$  eine zweite Nullphase auf. Die Phasenverschiebung zwischen den Eingangsspannungen  $U_1$  ( $U_2$ ,  $U_3$ ) und dem Phasenstrom  $I_F$  (43) ist im Bereich von  $f_0$  bis  $f_a$  positiv. Im verbleibenden Erregerfrequenzbereich ist sie negativ. Alle drei Abhängigkeiten sind stetig, d. h. sie haben keine Bereiche mit nichtdefinierten Zuständen.

In der Position 44, Fig. 15 ist eine Abhängigkeit einer Steuerspannung dargestellt, d. h. die Abhängigkeit der Drehfrequenz  $\eta$  von der Höhe der Erregerspannung  $U_1$  ( $U_2$ ,  $U_3$ ) bei Betrieb des Motors auf der mechanischen Resonanzfrequenz  $f_0$ . Praktisch verläuft diese Abhängigkeit linear. Sie weist dann einen kleinen Sprung bei der Spannung  $U_0$  auf, wenn die Queramplitude der Schwingung des Oszillators 2 kleiner als die Unebenheiten der Funktionsfläche 5 sind. In der Position 45, Fig. 15 sind die mechanischen Kennwerte des erfindungsgemäßen Motors dargestellt; die Abhängigkeit der Drehfrequenz  $\eta$  vom Lastmoment  $M$ , bei Betrieb des Motors auf der mechanischen Resonanzfrequenz  $f_0$ . Bis zum Lastmoment  $M_e$  ist die Abhängigkeit linear. Dieses Moment bedeutet Abriß des Friktionskontaktes. Im Last-

bereich von  $M_e$  bis  $M_{\max}$  arbeitet der Motor unregelmäßig. Durch die gerissene Linie ist der maximal mögliche lineare Wert des Lastmoments  $M'_{\max}$  angegeben. Dieser Wert kann bei idealer Auswahl der Werkstoffe für das Friktionspaar Stator 1 und Rotor 6 erreicht werden. Position 46, Fig. 15 ist das Gütediagramm des Motors.

Das ist die Abhängigkeit des Wirkungsgrades  $\eta$  vom Lastmoment  $M$  bei Betrieb des Motors auf der mechanischen Resonanzfrequenz  $f_0$ . Bis zum Lastwert  $M_e$  hat die Abhängigkeit die Form einer Parabel. Das Maximum befindet sich in der Nähe des halben maximal möglichen Lastmoments  $1/2 M'_{\max}$ . Die Höhe des maximalen Wirkungsgrades  $\eta_{\max}$  hängt vom Verhältnis Verlustwiderstandes  $R'_M$  des Oszillators zum Verlustwiderstand des Friktionskontaktes  $R'_F$  ab. In der praktischen Realisierung ist der Verlustwiderstand des Friktionskontaktes  $R'_F$  immer größer als der Verlustwiderstand des Oszillators  $R'_M$ . Deshalb hat der erfindungsgemäße Motor einen ausreichend großen Wirkungsgrad, der im Bereich von 30—70% liegt.

In der Fig. 16 sind einige Varianten von vollständig aus Piezokeramik gefertigten monolithischen Oszillatoren 2 des erfindungsgemäßen Motors dargestellt. Diese Oszillatoren sind die Wellenleiter für die vom Generator 4 erzeugte Wanderwelle. Jede der dargestellten Varianten kann in Abhängigkeit von der konkreten Konstruktion und den geforderten Motorparametern verwendet werden. So ermöglicht z. B. der als langgezogener Zylinder ausgeführte Oszillator 2, dessen Höhe gleich oder größer als sein Durchmesser ist (Position 47), den Aufbau von piezoelektrischen Motoren minimaler Abmessungen mit einem Wanderwellengenerator 4 (Fig. 1).

Der Oszillator 2 als kurzer, breiter Zylinder (Position 48) wird dann verwendet, wenn maximale mechanische Leistungen gefordert werden. In dem Fall kann man den Durchmesser des Oszillators 2 unbegrenzt vergrößern, dadurch wird die Zahl der Wanderwellengeneratoren 4 und entsprechend die Zahl der mit dem Rotor 6 in Kontakt tretenden Wellen vergrößert.

Ein Oszillator in Scheibenform (Position 49) kann für einen flachen Motor, der nur eine minimale Höhe hat, eingesetzt werden. In dem Fall, wenn ein piezoelektrischer Motor mit minimalen Querschnitt und einer Öffnung im Zentrum erforderlich ist, wird ein Oszillator in Form eines zylindrischen Ringes (Position 50) eingesetzt. Die Verwendung eines Oszillators mit konischer Querschnittsform (Position 51, 52) gestattet eine Vervielfachung der Schwingungsgeschwindigkeit. Solche Oszillatoren funktionieren ähnlich wie Konzentratoren für mechanische Spannungen, die die Schwingungsgeschwindigkeit in einem kleinen Bereich ihres Querschnitts vervielfachen. Die Verwendung von vervielfachenden Konzentratoren ermöglicht es, die Schwingungsgeschwindigkeit um das 1,5—2fache zu erhöhen und folglich auch die Drehfrequenz des Rotors. Die Positionen 53, 54 zeigen Oszillatoren mit konischer Funktionsfläche 5. Solche Oszillatoren ermöglichen es, piezoelektrischen Motoren ohne zentrierende Kugellager aufzubauen, was wesentlich die Motorkosten verringert. Da die konische Funktionsfläche 5 des Oszillators 2 eine große Fläche bildet, erhöht sich proportional dazu die mechanische Leistung des Motors.

Der erfindungsgemäße piezoelektrische Motor beruht auf einem Friktionskontakt von Oszillator 2 und Rotor 6, d. h. die aufeinander einwirkenden Flächen überliegen einem Friktionsverschleiß. Der Verschleißgrad dieser Oberflächen bestimmt die Funktionsdauer



(Standzeit) des Motors und hängt von der Verschleißbeständigkeit der eingesetzten Werkstoffe für die Friktionspaarung von Funktionsfläche 5 des Oszillators 2 und Oberfläche des Rotors 6 ab. Die Auswahl des Rotorwerkstoffes stellt keine besonderen Probleme dar. Er kann sowohl aus sehr harten Werkstoffen wie Keramik auf der Basis von Aluminiumoxid, Zirkoniumoxid, Titankarbid, Wolframkarbid, legierten und wärmebehandelten Stahl u.ä. gefertigt werden als auch aus weichen zusammengesetzten Friktionswerkstoffen auf der Basis von wärmerreaktiven Platten mit festen Füllstoffen. Die Auswahl des Oszillatorwerkstoffes ist schwieriger, da der Oszillator aus piezoaktiven Material gefertigt werden muß. Direkt als Werkstoff für den Friktionskontakt ist nur eine begrenzte Zahl von piezoaktiven Werkstoffen einsetzbar. Das sind Quarz, einige andere Monokristalle und Bariumtitanat. Quarz hat einen sehr kleinen Piezomodul, was seine Verwendung einschränkt. Bariumtitanat besitzt einen niedrigen Curie-Punkt, was einem Einsatz in einem großen Temperaturbereich widerspricht. Die Frage des Einsatzes eines breiten Spektrums von Piezokeramik im erfindungsgemäßen Motor ist dadurch gelöst worden, daß die Funktionsfläche 5 des Oszillators 2 mit einer dünnen abriebfesten Schicht versehen ist, die dem Friktionsverschleiß des Oszillators 2 entgegenwirkt und gleichzeitig den Reibungskoeffizienten der Funktionsfläche 5 bestimmt. Der Werkstoff für die Friktionsschicht 5 muß folgenden Forderungen entsprechen. Er muß widerstandsfähig gegenüber dem Friktionsverschleiß aufgrund der Friktionswirkung Oszillator-Rotormotor sein; er muß eine feste, z. B. chemische Verbindung, mit der Piezokeramik eingehen. Er muß außerdem widerstandsfähig gegenüber starken Ultraschallfeldern sein.

In der Fig. 17 (Positionen 55, 56, 57, 58, 59) sind einige Varianten einer abriebfesten Schicht 60 des erfindungsgemäßen piezoelektrischen Motors dargestellt. Betrachteten wir diese Varianten näher. Die abriebfeste Schicht kann ein 0,1—0,3 mm dünner, aus Oxidkeramik (Basis Aluminiumoxid oder anderer Werkstoff) gefertigter Ring 61 sein, der auf den piezoelektrischen Oszillator 2 mit einem Material, das eine chemische Verbindung mit der Oxidkeramik und der Piezokeramik eingeht, z. B. Glas, geklebt ist. Ein solches Glas muß eine ausreichende Menge Bleioxid enthalten. In der Position 56 (Fig. 17) ist eine Variante einer abriebfesten Schicht 60 dargestellt, welche im gegebenen Fall eine dünne Schicht eines harten abriebfesten und auf die Funktionsfläche 5 des Oszillators 2 aufgetragenen Glases darstellt. Das Glas wird vor der Polarisierung auf den Oszillator 2 aufgebracht. Damit das Glas bei der Abkühlung nicht splittert, muß es entsprechend dem Temperaturexpansionskoeffizienten ausgewählt werden, und zwar so, daß dieser Koeffizient sich nicht um mehr als 5% vom Temperaturexpansionskoeffizienten der Piezokeramik unterscheidet. Solche Schichten werden für Motoren kleiner Leistung eingesetzt.

Die Verwendung einer Friktionsschicht aus reinen Glas hat den Nachteil, das die Gläser einen sehr kleinen Reibungskoeffizienten haben. Zur Erhöhung des Reibungskoeffizienten kann das Glas mit einem Pulver 62 aus einem abrasiven Material versetzt werden (Position 57 der Fig. 17). Als abrasiver Füllstoff können Pulver aus Aluminiumoxid, Titankarbid, Titanitrid o. ä. verwendet werden. In einer solchen Ausführungsvariante kann der Wellenwiderstand der Friktionsschicht 60 genau ausgewählt werden, was sie für die Ultraschallwellen nicht unterscheidbar macht, d. h. die Sicherheit der

Verbindung wird erhöht und damit die Leistung des Motors gesteigert.

Besonders feste Friktionsschichten für piezokeramische Leistungsmotoren im Schrittbetrieb können aus poröser Oxidkeramik, angefüllt mit einem, eine Verbindung mit der Piezokeramik des Oszillators 2 eingehenden Material, hergestellt werden. Eine solche Friktionsschicht 60 zeigt die Position 58, Fig. 17. Gut für dieses Ziel ist eine poröse Aluminiumoxidkeramik geeignet, deren Poren mit einem leichtschmelzenden und eine chemische Verbindung mit der Piezokeramik des Oszillators 2 eingehenden Glas aufgefüllt werden.

In der Fig. 17, Position 59 ist eine Ausführungsvariante der Friktionsschicht 60 als Doppelschichtstruktur mit einer Grundschicht 63 und einer Zwischenschicht 64 abgebildet. In dieser Variante bestimmt die Grundschicht die Friktionseigenschaften der Funktionsfläche 5, und die Zwischenschicht 64 bildet eine feste Verbindung zwischen Piezokeramik und Oszillator 2. Es technologisch sinnvoll, die Zwischenschicht 64 als Metallschicht aufzutragen, die gleichzeitig die Struktur der Elektroden 15, 16 des Oszillators 2 bildet. Eine solche Deckschicht kann durch chemisches Abscheiden von Nickel, durch Sputtern von Nickel, Tantal oder eines anderen Materials mittels Ionenimplantation erzeugt werden. Die Grundschicht 63 aus Chrom oder einen anderen festen Materials kann auf die Zwischenschicht 64 im Bereich des Friktionskontaktes mittels chemischen oder elektrochemischen Verfahrens aufgetragen werden. Die vorgeschlagene Erfindung kann auch andere geeignete Verfahren zur Bildung der Friktionsschicht 60 nutzen.

Jede Variante des Oszillators 2 für den erfindungsgemäßen piezoelektrischen Motor enthält eine Anzahl von Wanderwellengeneratoren 4, die praktisch sein gesamtes Volumen ausfüllen. Diese Generatoren legen die Struktur der Elektroden 15, 16 auf der Oberfläche des Wellenleiters 3 des Oszillators 2 fest. Fig. 18 zeigt die wichtigsten Ausführungsvarianten für die Elektroden 15, 16. In der Position 65 ist ein Oszillator 2 mit einem Generator 4 und nachfolgend drei Gruppen von Elektroden 15, 16 abgebildet. Jede dieser Elektrodengruppe bildet einen Stehwellengenerator 9, 10, 11 (Fig. 1). Position 66 zeigt einen Oszillator 2 als kurzen Zylinder. Dieser Oszillator verfügt über vier Wanderwellengeneratoren 4. Alle Elektroden 15 dieses Oszillators bilden nach außen eine gemeinsame Elektrode. Die getrennten Elektroden 16 befinden sich auf der Innenfläche des Oszillators 2. In der Position 67 ist der Oszillator 2 als Ring mit auf seinen ebenen Flächen angeordneten Elektroden 15, 16 abgebildet. Die Position 68 stellt eine Ausführungsvariante des Oszillators 2 mit streifenförmigen Elektroden 15, 16 auf der Außenfläche vor. Ein solcher Oszillator 2 besitzt eine Längspolarisation der Oberfläche des Wellenleiters 3 und kann bei Anregung des Oszillators mit hoher Spannung eingesetzt werden. In dieser Ausführungsvariante hat der Oszillator 2 keine Elektroden auf seiner Innenfläche. Alle Elektroden 16 dieses Oszillators sind parallel geschaltet und bilden die gemeinsamen Elektroden für die Stehwellengeneratoren 9, 10, 11. Folglich gehört jede der Elektroden 15 zu einem der Generatoren 9, 10, 11. Position 69 der Fig. 18 zeigt einen abgewinkelten Oszillator 2 mit einer Variante für die Elektroden 15, 16, bei der alle Verbindungen zwischen den Elektroden als leitende Linien 70 ausgeführt sind. Eine solche Struktur kann auf photochemischen Wege hergestellt werden.

Die vorgeschlagene Erfindung sieht eine besondere



Konfiguration für die Elektroden jedes Stehwellengenerators 9, 10, 11 vor (Fig. 19, Position 71). In dieser Ausführungsvariante haben die Elektroden 15, 16 die Höhe  $c$ , die etwa gleich der halben Höhe  $h$  des Oszillators 2 ist. In diesem Fall wird gleichzeitig mit der Longitudinalwelle 500 eine elastische Welle 700 erzeugt. Das Amplitudenverhältnis von Longitudinalwelle und elastischer Welle kann durch Ändern der Höhe der Elektroden 15, 16 verändert werden. Die Länge der elastischen Welle hängt von der Oszillatorhöhe  $h$  ab. Durch Variation der Höhe  $c$  der Elektroden 15, 16 und der Höhe  $h$  des Oszillators 2 können solche Werte eingestellt werden, bei denen die Amplitude und die Länge der elastischen Welle gleich der Amplitude und der Länge der Longitudinalwelle ist, siehe Wellendiagramm der Fig. 19. Bei gleichzeitiger Erzeugung dieser zwei Wellen im Oszillator 2 überlagern sich die von ihnen bedingten Verformungen. Fig. 19 zeigt ein Bild der Gesamtverformung des Oszillators 2. Daraus ist erkennbar, daß die Amplitude der überlagerten Welle der Funktionsfläche 5 gleich der doppelten Amplitude der Longitudinalwelle ist und daß auf der Stirnfläche 7 sich die Längs- und die elastischen Verformungen gegenseitig kompensieren, d. h. diese Stirnfläche 7 wird nicht verformt, es entsteht keine Welle. Offensichtlich ist, daß bei Erzeugung von drei Stehwellen im Oszillator 2 durch die drei Generatoren 9, 10, 11 (Position 72, Fig. 20), analog zu dem in Position 71, Fig. 19 dargestellten Generator, im Oszillator 2 eine unsymmetrische Wanderwelle erzeugt wird, und zwar so, wie in Fig. 20 dargestellt. Diese Welle verformt die Funktionsfläche 5, die Stirnfläche 7 wird dabei nicht verformt. In dieser Variante eines piezoelektrischen Motors wird die Energie des Oszillators 2 nicht von der schallisolierenden Unterlage 8 aufgenommen. Deshalb haben solche Motoren einen potentiell höheren Wirkungsgrad.

Die vorgeschlagene Erfindung sieht verschiedene Varianten zur Ansteuerung der Stehwellengeneratoren 9, 10, 11 mittels der Erregerquellen 17, 18, 19 vor. In der Fig. 21 (Positionen 73, 74, 75) sind die das allgemeine Erregerprinzip illustrierenden Schaltungen zur Verbindung der Erregerquellen 17, 18, 19 mit den Generatoren 9, 10, 11 dargestellt.

Die Schaltung nach Position 73 veranschaulicht die Fremderregung der Generatoren 9, 10, 11 durch die Quellen 17, 18, 19. Es ist offensichtlich, daß diese Schaltung in das Schaltbild nach Position 74 umgewandelt werden kann, wo alle Anschlüsse 21 der Quellen 17, 18, 19 in einem Sammelleiter 76 vereinigt sind und alle Elektroden 15 der Generatoren 9, 10, 11 durch eine gemeinsame Elektrode 77 ersetzt sind. Der Sammelleiter 76 und die gemeinsame Elektrode 77 sind über einen Verbindungsleiter 78 miteinander verbunden. Eine solche Abwandlung ändert das allgemeine Erregerprinzip nicht, läßt aber eine Vereinfachung der Schaltung zu. Außerdem kann man, da die Quellen 17, 18, 19 in Amplitude und Frequenz gleiche elektrische Spannungen, die zueinander in der Phase um  $2/3 \pi$  ( $120^\circ$ ) verschoben sind, bereitstellen, und da die elektrischen Widerstände der Generatoren 9, 10, 11 untereinander gleich sind, fließt folglich durch den Verbindungsleiter 78 kein Strom und man kann ihn gemäß Position 75 ausschließen. Das bedeutet, daß die gemeinsame Elektrode 77 keinen elektrischen Anschluß zu haben braucht. In der praktischen Realisierung der vorgeschlagenen Erfindung ist es bei Fremderregung der Generatoren 9, 10, 11 schwierig, auf einfache Weise einen Synchron- und In-Phase-Betrieb der Erregerquellen 17, 18, 19 zu gewähr-

leisten. Deshalb sieht die erfindungsgemäße Ausführung eine Selbsterregung vor, die am Wesen der Erfindung nichts ändert. Bei einer Selbsterregung der Generatoren 9, 10, 11 stellt die Erregerquelle 17 des Grundgenerators 9 die Quelle für das Stützerregersignal dar und die Erregerquellen 18, 19 dienen faktisch zur Phasendrehung und zur Verstärkung dieses Signals.

Die elektrische Schaltung einer solchen erfindungsgemäßen Variante ist in Fig. 22 dargestellt. In dieser Ausführungsvariante schließt die Erregerquelle 17 einen Generator 79 für das elektrische Stützsinal und einen Leistungsverstärker 80 ein, und die Quellen 18, 19 schließen Phasendrehglieder 81, 82 und Pufferverstärker 83, 84 mit ein. Außerdem können die Quellen 18, 19 Vorrichtungen 85, 86 zur Umpolung des Phasenwinkels enthalten.

Eine solche Ausführungsvariante arbeitet nach folgenden Prinzip. Der Generator 79 für das Stützsinal stellt ein elektrisches Signal bereit, dessen Frequenz gleich der mechanischen Resonanzfrequenz  $f_0$  des Oszillators 2 ist. Dieses Signal gelangt auf den Verstärker 80 und auf die Phasendrehglieder 81, 82 der Quellen 18, 19. Die Phasendrehglieder drehen die Phase des Signals jeweils um  $\pm 2/3 \pi$  ( $\pm 120^\circ$ ).

Von den Phasendrehgliedern 81, 82 wird das Signal jeder Quelle 18, 19 auf die Vorrichtungen 85, 86 zur Umpolung des Phasenwinkels gegeben. Danach werden die Signale durch die Verstärker 83 und 84 verstärkt. Die durch die Verstärker 80, 83 und 84 verstärkten drei Signale werden als Erregerspannungen der Quellen 17, 18, 19 auf die entsprechenden Stehwellengeneratoren 9, 10, 11 gegeben.

Das Frequenzdiagramm 42 (Fig. 15) des erfindungsgemäßen piezoelektrischen Motors ist stetig, d. h. hat keine Punkte mit instabilen Zuständen. Deshalb kann sich die Frequenz des Steuergenerators 79 in einem beliebigen Bereich dieses Diagramms befinden. Bei Bedarf ist es deshalb möglich, durch Verändern der Erregerfrequenz die Drehfrequenz des Rotors 6 zu ändern. Mit Hilfe der Vorrichtungen 85, 86 kann durch Umschalten der Phase der Signale von den Quellen 18, 19 in die jeweilige Gegenrichtung (um  $\pm 120^\circ$  bezogen auf die Phasenlage des Signals der Quelle 17), die Drehrichtung des Rotors umgekehrt werden.

In Fig. 23 ist eine Ausführungsvariante des erfindungsgemäßen Motors mit einem Steuergenerator 79 als frequenzgesteuerter Autogenerator abgebildet. In einer solchen Ausführungsvariante kann die Drehfrequenz des Rotors 6 durch Ändern der Steuerspannung  $U_r$ , d. h. durch Ändern der Erregerspannung des Steuergenerators 79, geändert werden.

Für viele Verwendungsfälle der vorgeschlagenen Erfindung ist es sinnvoll, daß, wegen aller destabilisierenden Einwirkungen, die Arbeitsfrequenz des Motors gleich oder im wesentlichen gleich der mechanischen Resonanzfrequenz  $f_0$  des Oszillators 2 ist. Eine solche Ausführungsvariante ist in Fig. 24 zu sehen. Entsprechend dieser Variante enthält der erfindungsgemäße Motor zusätzlich einen positiven Rückkopplungszweig 87 mit einem Eingang 88, einem Filter 89, einer Phasenschieberkette 90 und einem Verstärker 91. Außerdem enthält die Ausführungsvariante ein in Reihe mit dem Grundgenerator 9 geschaltetes Impedanzelement 92, die Erregerquelle 17, die in diesem Fall nur den Verstärker 80 enthält. Der Eingang 88 des Rückkopplungszweiges 87 ist über einen Leiter 880 mit den Elektroden 15, 16 des im Grundgenerator 9 enthaltenen Impedanzelementes 92 verbunden. Fig. 24 zeigt strichliniert eine

zweite Verbindungsmöglichkeit 881. Der Ausgang des Rückkopplungszweiges 87 ist mit dem Pufferverstärker 80 der Quelle 17 verbunden.

Für das Impedanzelement gibt es mehrere Ausführungsvarianten. Es kann ein Widerstand R, eine Induktivität L oder ein Kondensator C sein.

Insgesamt stellt die betrachtete Variante einen elektromechanischen Autogenerator dar, der auf der mechanischen Resonanzfrequenz  $f_0$  des Oszillators 2 angeregt wird. Realisiert wird der Autogenerator durch den Grundgenerator 9 und seine Erregerquelle 17 mit dem zusätzlichen Rückkopplungsweig 87, die eine geschlossene elektromechanische Kette bilden. Zur Erregung dieser Kette auf der mechanischen Resonanzfrequenz  $f_0$  des Oszillators 2, wird das Phasendiagramm 43 (Fig. 15) des erfindungsgemäßen Motors verwendet, welches bei oder in der Nähe der Frequenz  $f_0$  einen Nulldurchgang hat.

Die o.g. geschlossene elektromechanische Kette wird so ausbalanciert, daß ihr Verstärkungsfaktor bei der Frequenz  $f_0$  größer als eins ist und die Phasenverschiebung zwischen Eingangs- und Ausgangssignal bei dieser Frequenz an jeder Unstetigkeitsstelle der Kette gleich Null ist. Dabei wird der Verstärkungsfaktor durch die Verstärker 80, 81 und die Phasenverschiebung durch die Phasenschieberkette 90 vorgegeben. Die Größe der Phasenverschiebung des Signals hängt davon ab, welches Bauelement als Impedanzelement 92 eingesetzt wird. Falls ein Widerstand verwendet wird, muß die Phasenverschiebung nur korrigierend sein und kann im Bereich  $\pm 10^\circ$  liegen, falls ein Kondensator C verwendet wird, befindet sie sich im Bereich von  $+90^\circ$  und falls eine Induktivität ist, liegt sie bei  $-90^\circ$ .

Fig. 25 zeigt eine Ausführungsvariante mit einem Stromwandler 93 im Eingangskreis des Rückkopplungs- zweiges 87. Diese Variante vereinfacht die Schaltung des elektromechanischen Autogenerators für den Fall, daß der Ausgang der Elektrode 77 fehlt. Insgesamt funktioniert die Vorrichtung analog zur oben betrachteten (Fig. 24).

In einigen Anwendungsfällen, in denen es unbedingt erforderlich ist, die Erregerspannung  $U_1$  ( $U_2$ ,  $U_3$ ) genauer auf die mechanische Resonanzfrequenz  $f_0$  des Oszillators 2 abzustimmen, kann eine Variante verwendet werden, die eine zusätzliche Rückkopplungselektrode 95 enthält (Fig. 26, Position 94). Diese Elektrode 95 befindet sich am Ort des Maximums der mechanischen Spannungen der Stehwelle des Grundgenerators 9. Es sind zwei Funktionsweisen der Elektrode 95 möglich, nämlich Leerlauf und Kurzschlußbetrieb. Im Leerlauf stellt die Elektrode 95 keinen Widerstand für die elektrische Last dar. Bei Erregung des Generators 17 wird aufgrund des direkten piezoelektrischen Effektes auf der Elektrode 95 eine der mechanischen Spannung der Stehwelle des Grundgenerators 9 proportionale Spannung gebildet. Im Kurzschlußbetrieb der Elektrode 95 mit der gemeinsamen Elektrode 77 fließt auf Grund des niedrigen Widerstandswertes ein Kurzschlußstrom. Dieser Strom ist proportional zur mechanischen Spannung der Stehwelle des Grundgenerators 9. Für den elektromechanischen Autogenerator mit der Rückkopplungselektrode 95 werden die Frequenzdiagramme 96 und Phasendiagramme 97 und 98 der Leerlaufspannung  $U_s$  und des Leerlaufstroms  $I_s$  entsprechend den Positionen 96, 97 und 98 verwendet.

Fig. 27 zeigt eine Variante des elektromechanischen Autogenerators mit der Rückkopplungselektrode 95. Die Funktion der Elektrode 95 wird durch einen Wider-

stand 99 vorgegeben. Die Vorrichtung wird über den Verstärkungsfaktor der Rückkopplung und über die Phasenverschiebung analog zu Fig. 24 ausbalanciert.

Die vorgeschlagene Erfindung sieht auch die Verwendung eines piezoelektrischen Motors im Schrittbetrieb mit minimaler Start- und Stopzeit vor. Dafür ist im Rückkopplungsweig 87 (Fig. 28) ein Schalter 100 mit einem Steuereingang 101 vorgesehen, der den Stromkreis ein- und ausschaltet. Beim Ausschalten unterbricht oder schließt der Schalter 100 den Signalstromkreis der Rückkopplung kurz. In beiden Fällen wird die Ansteuerung des elektromechanischen Autogenerators bei minimaler Stopzeit des Motors unterbrochen. Beim Einschalten des Rückkopplungs- zweiges 87 mittels des Schalters 100 wird der Autogenerator beschleunigt gestartet. Die Steuerung durch den Schalter 100 und folglich auch des Schrittbetriebs erfolgt mit einer Impulssteuerspannung  $U_1$  beliebiger Dauer.

Im folgenden werden einige mechanische und elektrische konstruktive Ausführungsbeispiele des erfindungsgemäßen piezoelektrischen Motors beschrieben.

In den Fig. 29 und 30 ist eine Variante des erfindungsgemäßen piezoelektrischen Motors mit einem in seiner Längsachse X-X gestreckten Oszillator 2 und mit einem (oder zwei) Wanderwellengenerator(en) abgebildet. Der Motor besteht aus einem Stator 1 mit dem Oszillator 2, der gleichzeitig den Wellenleiter 3 für die Longitudinalwandlerwelle bildet. Der Oszillator 2 ist auf einem Grundkörper 102 frei beweglich angeordnet. Wenn der Grundkörper 102 aus Metall gefertigt ist, muß zwischen diesem und dem Oszillator 2 eine Isolierunterlage 103 vorhanden sein, die einen Kurzschluß der Elektrode 16 (77) mit dem Stator 1 des Motors verhindert. Mit seiner funktionsfreien Stirnfläche 7 stützt sich der Oszillator 2 auf der schallisolierenden Unterlage 8 ab. An die Funktionsfläche 5 des Oszillators 2 wird der Rotor 6, der über eine elastische Buchse 105 mit einer Motorachse 106 verbunden ist, mit Hilfe einer Feder 104 angepreßt. Die Achse 106 ist durch Kugellager 107 so gelagert, daß sie sich längs ihrer Achse frei bewegen und damit den Anpreßdruck der Feder 104 auf den Rotor 6 übertragen kann.

Bei Erzeugung einer Wanderwelle im Oszillator 2 überträgt die Funktionsfläche 5 des Oszillators 2 auf den Rotor 6 ein Drehmoment und veranlaßt ihn dadurch, sich zu drehen. Diese Drehung wird über die elastische Buchse 105 auf die Motorachse 106 übertragen. Beim Anlegen einer mechanischen Last auf die Achse 106, erzeugt der Oszillator 2 ein Drehmoment entgegengesetzt zum dem auf die Achse 106 und den Rotor 6 wirkenden Drehmoment. Da sich der Oszillator 2 mit seiner Stirnfläche 7 auf die schallisolierende Unterlage 8 abstützt, wird die Drehung des Oszillators 2 durch das Reibmoment zwischen Unterlage 8 und der Stirnfläche 7 verhindert. Dieses Reibmoment ist immer größer als das Drehmoment im Friktionskontakt des Motor, deshalb verharrt der Oszillator 2 in Ruhelage. Diese Motorvariante zeigt eine einfache Konstruktion, die eine schnelle Montage ermöglicht. Sie kann mit kleinen Abmessungen hergestellt werden. Da ihr Außendurchmesser nur 2–3 mm betragen kann, stellt sie eine ernste Konkurrenz zu herkömmlichen Elektromotoren dar.

Fig. 31 zeigt den erfindungsgemäßen Motor mit einem Ringoszillator 2, der einen ausreichend großen Durchmesser (größer 120 mm) und eine ausreichend große Funktionsfläche 5 (15–20 mm) besitzt. Im Oszillator 2 können mehr als zehn Wanderwellengeneratoren 4 untergebracht werden. Dadurch werden große

Motorleistungen gewährleistet. Deshalb müssen bei dieser Ausführung der Grundkörper 102 und der Rotor 6 zur Ableitung der während des Motorbetriebs im Oszillator 2 entstehende Wärme über eine gute Wärmeleitfähigkeit verfügen. Für diese Zwecke ist Aluminium und seine Legierungen vorteilhaft einsetzbar. In dieser Variante ist der Rotor 6 des Motors mit einer dünnen, die Friktionseigenschaften des Rotors 6 bestimmenden Friktionsschicht 600 versehen.

Die Fig. 32 und 33 zeigen einen piezoelektrischen Leistungsmotor. Dieser Motor hat einen aus den zwei Teilen 108 und 109 bestehenden Rotor. Das Teil 108 ist fest mit der Achse 106 verbunden. Das Teil 109 kann sich längs der Achse 106 bewegen. Beide Rotorteile werden an zwei konische Funktionsflächen 110 des zylindrischen Oszillators 2 mittels einer elastischen Unterlage 111 angepreßt, die wiederum durch eine Schraubenmutter 112 zwischen dem Teil 109 und einer Scheibe 113 gepreßt wird. Die elastische Unterlage 111 kann aus einem elastischen synthetischen Material wie z. B. Polyurithan gefertigt werden. Der Oszillator 2 dieses Motors ist in einem Gehäuse 114 untergebracht, das durch einen Bügel mit gestauchtem Bolzen darstellt ist. Der Motor hat keine Lager. Sein Rotor 108, 109 wird durch die konischen Funktionsflächen 110 des Oszillators 2 zentriert. Diese Konstruktion ermöglicht eine maximale Leistung des piezoelektrischen Motors. Diese Leistung wird nur durch die dynamische Festigkeit des piezokeramischen Oszillators 2 begrenzt.

Die vorliegende Erfindung ermöglicht den Aufbau eines noch leistungsstärkeren piezoelektrischen Motors, in dem ein metallischer Wellenleiter verwendet wird. Eine mögliche Variante eines solchen Motors ist in den Fig. 34 und 35 dargestellt. Er besteht aus dem Stator 1 und dem Oszillator 2 mit dem metallischen Wellenleiter 3. Der Wellenleiter 3 wird aus einem stabilen, wärmebehandelten Stahl gefertigt, was maximale mechanische Spannungen in Wellenleiter zuläßt. Diese sind für Stahl bedeutend größer als für die piezoelektrische Keramik. Ein solcher Motor ermöglicht deshalb maximale Leistungen pro Volumeneinheit des Wellenleiters.

Die Stehwellengeneratoren werden in der vorliegenden Konstruktion in Form eines Paketes von piezoelektrischen Wandlern 116 gefertigt, die durch Bolzen 117 zusammengepreßt werden. Sie werden koaxial zur Achse 106 und um den Wellenleiter 3 herum angeordnet und sind mit ihm mittels einer Lasche 118 verbunden.

Dieser Motor arbeitet folgendermaßen. Jede Paketgruppe von piezoelektrischen Wandlern 116, die einen Stehwellengenerator 9, 10, 11 bilden, erzeugt im Wellenleiter 3 seine Stehwelle 26, 27, 28 (Fig. 7). Die Überlagerung dieser Wellen ergibt die Wanderwelle 29, die den Rotor 6 dreht.

Diese Konstruktion des piezoelektrischen Motors mit piezoelektrischen Wandlerpaketen ermöglicht es, die mechanische Leistung des Motors durch Vergrößern der Paketzahl und entsprechend des Durchmessers des Wellenleiters unbegrenzt zu erhöhen. Jedes Paket mit einem Durchmesser von 30 mm hat eine Grenzwandlungsleistung von etwa 100 W. Bei dreißig Paketen auf dem Oszillator 2 und einem Wirkungsgrad des piezoelektrischen Motors von 30—40%, kann eine mechanische Leistung von etwa 100 W auf der Motorachse 106 erreicht werden.

Entsprechend den Forderungen der konkreten Anwendung ermöglicht die Erfindung verschiedene Modifikationen für den piezoelektrischen Motor. Fig. 36 zeigt eine Variante eines für den Einsatz in speziellen

optischen Systemen vorgesehen Motors. Der Motor hat eine große zentrale Öffnung 231. Der Rotor 6 wird mittels des Magnetings 119, der wiederum vom magnetischen Gehäuse 120 angezogen wird, an den Oszillator 2 gepreßt.

Die Erfindung umfaßt unterschiedliche Ausführungsvarianten der Erregerquellen 9, 10, 11 des Oszillators 2, von denen nachfolgend vier Varianten mit den wichtigsten Konstruktionselementen beschrieben werden.

Fig. 37 zeigt die elektrische Prinzipschaltung des erfindungsgemäßen Motors, der nach dem Prinzip der Frequenzsteuerung die Drehgeschwindigkeit des Rotors regelt. Diese Schaltung entspricht den Blockschaltbildern nach den Fig. 22 und 23. Die Schaltung besteht aus der Quelle 17 des Grundgenerators 9, der den Steuergenerator 79 und den Leistungsverstärker 80 einschließt.

Der Steuergenerator 79 ist nach dem Prinzip des Autogenerators mit Wien-Brücke aufgebaut. Die Frequenz des Steuergenerators 79 kann mittels der Steuerspannung  $U_R$  variiert werden, die auf einen Kondensator 122 wirkt und dessen elektrische Kapazität ändert. Die Kapazität des Kondensators 122 ist so gewählt, daß ihre Änderung die Frequenz des Steuergenerators 79 in dem in Fig. 15, Position 41 dargestellten Bereich der Frequenzcharakteristik ändert. In dieser Variante enthalten die Quellen 18, 19 der Zusatzgeneratoren 10, 11 die Phasendrehglieder 81, 82, die Vorrichtungen zur Umpolung des Phasenwinkels 85, 86 und die Leistungsverstärker 83, 84. Die Phasendrehglieder 81, 82 sind aktive Phasenschieberzweige 123, 124 mit Operationsverstärkern, die die Phasen der Signale entsprechend um  $+2/3 \pi (+120^\circ)$  und  $-2/3 \pi (-120^\circ)$  drehen. Die Vorrichtungen 85, 86 erden Umschalter 125, 126, die den funktionellen Tausch der Phasendrehglieder 81, 82 durchführen, d. h. das Vorzeichen der Phasenverschiebung ändern. Eine solche Umschaltung ermöglicht, die Drehrichtung des Rotors 6 umzukehren. Die Verstärker 80, 83, 84 sind identisch und stellen Pufferverstärker (Leistungsverstärker) dar, die einen großen Durchlaßbereich aufweisen und fast im Schaltbetrieb arbeiten. Die betrachtete Vorrichtung arbeitet sowohl links als auch rechts der mechanischen Resonanzfrequenz  $f_0$  des Oszillators 2 sicher.

In Fig. 38 ist eine prinzipielle Schaltung entsprechend dem Blockschaltbild Fig. 24 (Autogenerator) dargestellt. In der Schaltung ist der Eingang des Rückkopplungszweiges 87 mit dem als Stromwiderstand  $R_i$  ausgeführten Impedanzelement 92. Die an diesem Widerstand anliegende Spannung ist proportional dem durch den Grundgenerator 9 fließenden Strom. Die Phasenverschiebung dieser Spannung bei der Frequenz  $f_0$  ist im Verhältnis zur Spannung am Generator 9 praktisch gleich Null. Vom Widerstand  $R_i$  gelangt die dem Strom proportionale Spannung auf das Bandfilter 89 ( $L_i, C_i$ ) und danach auf den Verstärker 91. Das auf die Frequenz  $f_0$  abgestimmte Bandfilter 89 begrenzt den Durchlaßbereich des Rückkopplungszweiges 86 und verhindert damit eine Selbsterregung des Schaltung im Bereich der Parasitär frequenzen des Oszillators 2. Die vom Verstärker 91 verstärkte Spannung gelangt auf den Ausgang des Rückkopplungszweiges 87 und von da auf den Leistungsverstärker 80 der Quelle 17 des Grundgenerators 9. Da die Gesamtphasenverschiebung im geschlossenen Kreis bei der Frequenz  $f_0$  gleich Null ist, ist der Verstärkungsfaktor bei dieser Frequenz größer als Eins, und die Quelle 17 mit dem Rückkopplungszweig 87 fängt bei der Frequenz  $f_0$  an zu schwingen und wirkt demzufolge

als Autogenerator, der diese Frequenz trotz Einwirkung destabilisierender Einflüsse beibehält. Die Phasendrehglieder 81, 82 enthalten die Phasenschieberzweige 123, 124, die wiederum zwei untereinander umschaltenden Phasenketten 127, 128 enthalten. Die Umschaltung erfolgt mit Umschaltern 129, 130, die faktisch eine Umkehrung der Vorzeichen der Phasenverschiebung erzeugen. Eine solche Umschaltung ermöglicht die Drehrichtung des Rotors 6 umzukehren. Die Leistungsverstärker 80, 83, 84 sind über die Trennfilter  $L_T C_T$  mit den Generatoren 9, 10, 11 verbunden. Dies ermöglicht die Verstärker im Schaltbetrieb zu betreiben, in dem die Ausgangsspannung steilen Fronten haben.

Fig. 39 zeigt eine Ausführungsvariante, in der der Kondensator  $C_T$  des Trennfilters  $L_T C_T$  als Impedanzelement 92 verwendet wird. Die Spannungsamplitude auf diesem Kondensator ist proportional zum Strom durch den Generator 9. Die Phase ist jedoch bezüglich des Generatorstrom um  $-90^\circ$  gedreht. Eine solche Phasenverschiebung erfordert eine nochmalige Drehung um  $-90^\circ$ . Diese Drehung erfolgt im Kondensatorkreis  $C_T$  des Bandfilters 89, wo die Spannung am Widerstand  $R_T$  im Verhältnis zum Kondensatorstrom  $C_T$  um  $-90^\circ$  gedreht ist. Dabei beträgt die Gesamtphasenverschiebung  $-180^\circ$ . Nochmals um  $-180^\circ$  dreht der Verstärker die Phase, so daß die Gesamtphasenverschiebung gleich Null wird. Da in dieser Variante die Drehrichtung des Rotors 6 nicht umkehrbar ist, enthält er keine Vorrichtungen 85 und 86.

In allen betrachteten Varianten des erfindungsgemäßen, in den Fig. 37, 38, 39 dargestellten Motors werden als Pufferverstärker 80, 83, 84 Halb-Brückenschaltungen mit bipolaren oder Feldeffekttransistoren (nicht dargestellt) verwendet, die als Spannungsschalter betrieben werden. Solche Schaltungen ermöglichen elektrische Spannungsamplituden an den Generatoren 9, 10, 11, die gleich der halben Versorgungsspannung sind. Falls höhere Spannungen gefordert werden, können Schaltungen mit Stromumschaltern verwendet werden. Diese Schaltungen ermöglichen eine Spannung an den Generatoren 9, 10, 11, die um das 2–3fache höher ist als die Versorgungsspannung der Leistungsverstärker.

Fig. 40 zeigt eine Variante des erfindungsgemäßen Motors mit Stromschaltern. Diese Variante enthält drei Stromumschalter 131, die von der Spannung  $E$  gespeist und als bipolare Transistoren mit einer Stromquelle in Form einer im Kollektorkreis enthaltenen Induktivität  $L_1$  ausgeführt sind. Die Spannungsamplitude an den Generatoren 9, 10, 11 beträgt etwa  $(2-3) \cdot E$ . In dieser Variante ist der Rückkopplungszweig 87 mit der Rückkopplungselektrode 95 verbunden, die bei der Frequenz  $f_0$  eine Phasenverschiebung von  $+90^\circ$  zwischen der Spannung am Generator 9 und der Spannung an dieser Elektrode 95 erzeugt (Fig. 26, Position 97). Die Phasenschieberkette 90 des Bandfilters 89 dreht die Phase nochmals um  $+90^\circ$ , so daß die Gesamtphasenverschiebung  $+180^\circ$  beträgt. Die Drehung der Phase in Gegenrichtung um  $-180^\circ$  erfolgt durch den Verstärker 91. Diese Ausführungsvariante stellt einen entsprechend Blockschaltbild Fig. 28 aufgebauten piezoelektrischen Motor im Schrittbetrieb mit kleiner Start-Stopp-Zeit dar. Für den Schrittbetrieb enthält die Schaltung einen Transistorschalter 100, der durch die Impulsspannung am Eingang 101 gesteuert wird. Beim Schließen des Schalters 100 wird die Rückkopplung aufgetrennt, was einen forcierten Abbruch der Schwingungen des elektromechanischen Generators zur Folge hat. Beim Öffnen des Schalters 100 wird der Autogenerator forciert gestartet.

In allen möglichen Varianten des erfindungsgemäßen piezoelektrischen Motors füllt die piezoelektrische Keramik das maximal mögliche Volumen des Oszillators aus. Deshalb zeichnen sich solche Motoren durch einen hocheffektiven Oszillator mit einem maximalen elektromechanischen Koeffizienten aus. Sie benötigen nur geringe Erregerspannungen und sind hoch belastbar, d. h. sie arbeiten auch bei hoher mechanischer Belastung des Oszillators. Der monolithische Oszillator solcher Motoren weist eine hohe Festigkeit auf, was maximale mechanische Spannungen und damit maximale Schwingungsgeschwindigkeiten zuläßt, und deshalb maximale mechanische Leistungen an der Motorachse ermöglicht.

So entwickelt der Motor bei einer spezifischen Tangentiallast auf der Funktionsfläche des Oszillators von  $10 \text{ N/cm}^2$  und einer Schwingungsgeschwindigkeit der Funktionsfläche von  $1 \text{ m/s}$  z. B. eine spezifische mechanische Leistung von  $10 \text{ W/cm}^2$  Funktionsfläche. Das heißt bei einem Oszillatordurchmesser von  $100 \text{ mm}$  und einer  $15 \text{ mm}$  breiten Funktionsfläche beträgt die maximal mögliche mechanische Leistung des Motors  $450 \text{ W}$ .

Die hohe mechanische Festigkeit des Oszillators bestimmt die hohe Funktionssicherheit und Standzeit des Motors, die sich an die Ausfallsicherheit von massiven Bauelementen annähert. Die einfache Konstruktion senkt den Selbstkostenpreis, was die Konkurrenzfähigkeit des Motors mit herkömmlichen Elektromotoren ermöglicht.

#### 30 Bezugszeichenliste

- 1 Stator
- 2 Oszillator
- 3 Wellenleiter
- 4 Wanderwellengenerator
- 5 Funktionsfläche des Oszillators
- 6 Rotor
- 7 Stirnfläche des Oszillators
- 8 schallisierende Unterlage
- 9 Grundgenerator für Stehwellen
- 10, 11 Zusatzgeneratoren für Stehwellen
- 12, 13, 14 Oszillatorenabschnitte
- 15, 16 Elektroden der Stehwellengeneratoren
- 17, 18, 19 Erregerquellen
- 20, 21 Anschlüsse der Erregerquellen
- 22 Mittellinie des Oszillators
- 23, 24, 25 Diagramme der Verformung der Funktionsfläche
- 26, 27, 28 Verformungszustände der Funktionsfläche
- 29 Wanderwellendiagramm
- 30, 31, 32, 33 Bewegungsabläufe von Punkten
- 34 Elementarvolumen des Oszillators
- 35 Elementares Schwingungssystem
- 36 Elementares Ersatzschaltbild
- 37, 38, 39 Ersatzschaltbilder der Stehwellengeneratoren
- 40 Friktionswandler
- 41–46 Elektromechanische Motorkennwerte
- 47–54 Oszillatorformen
- 55–64 Varianten von Friktionsschichten
- 60–70 Elektrodenanordnungen
- 71 Spezielle Anordnung von Elektroden
- 72 abgewerkelter Oszillator (schematische Darstellung) mit spezieller Elektrodenanordnung
- 73, 74, 75 Blockschaltbilder
- 76 Sammelleiter
- 77 gemeinsame Elektrode
- 78 Verbindungsleiter

79 Steuergenerator	
81, 82 Phasendrehglieder	
80, 83, 84 Pufferverstärker	
85, 86 Vorrichtungen zur Umpolung des Phasenwinkels	
87 Rückkopplungszweig	5
88 Eingang des Rückkopplungszweiges	
89 Bandfilter	
90 Phasenschieberkette	
91 Verstärker	
92 Impedanzelement	10
93 Stromwandler	
94 Teil des Oszillators	
95 Rückkopplungselektrode	
96—98 Kennwerte der Rückkopplungselektrode	15
99 Widerstand	
100 Schalter	
101 Steuereingang	
102 Grundkörper	
103 Isolierunterlage	
104 Feder	20
105 elastische Buchse	
106 Achse	
107 Kugellager	
108, 109 Teile des Rotors	
110 konische Funktionsflächen	25
111 elastische Unterlage	
112 Schraubenmutter	
113 Unterlegscheibe	
114 Gehäuse	
115 gestauchter Bolzen	30
116 Wandlerpakete	
117 Bolzen	
118 Flansch	
119 Magnetring	
120 magnetisch leitfähiges Gehäuse	35
121 Autogenerator mit Wien-Brücke	
122 Kondensator	
123, 124 Phasenschieberzweige	
125, 126 Umschalter	
127, 128 Phasenketten	40
129, 130 Umschalter	
131 Stromschalter	
150, 151 Pfeile	
231 Öffnung	
500, 700 Wellen	45
600 Friktionsschicht	
880 Leiter	
881 Verbindungsmöglichkeit	
X-X Achse	50

## Patentansprüche

1. Piezoelektrischer Motor mit einem Stator, der einen Oszillator in Form eines um eine Achse geschlossenen Wellenleiters mit an elektrische Erregerquellen angeschlossenen Generatoren für gleiche, gegeneinander verschobene Stehwellen aufweist, die sich zu einer elastischen Wanderwelle überlagern und mit einem Rotor, der sich in Friktionskontakt mit einer die Wellenbewegung vollführenden Funktionsfläche des Oszillators befindet, wobei die Länge des Wellenleiters gleich der Stehwellenlänge oder eines ganzzahligen Vielfachen der Stehwellenlänge ist, dadurch gekennzeichnet, daß der Oszillator (2) vollständig aus einem piezoelektrischen Material besteht und einheitlich polarisiert ist, daß die Generatoren (4) für die Stehwellen aus Sektoren paralleler Schichtelektroden (15,

16) bestehen, die rechtwinklig zur Richtung der Polarisation (150) des Oszillators (2) auf der Oberfläche des Wellenleiters (3) angeordnet sind, und daß die von den Generatoren (4) erzeugten Wellen Longitudinalwellen sind.

2. Piezoelektrischer Motor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß mehrere Generatoren (4) für die Wanderwelle bezüglich der Achse X-X über den Oszillator (2) regelmäßig verteilt angeordnet sind.

3. Piezoelektrischer Motor nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß jeder Generator (4) aus einem Grundgenerator (9) und zwei Zusatzgeneratoren (10, 11) besteht und daß die Länge des Generators (4) gleich der Länge oder einem ganzzahligen Vielfachen der Wellenlänge der Longitudinalwelle ist.

4. Piezoelektrischer Motor nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß der geschlossene Wellenleiter (3) als zylinderförmiger Körper aus piezoelektrischer Keramik gefertigt ist.

5. Piezoelektrischer Motor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Funktionsfläche (5) des Oszillators (2) mit einer dünnen verschleißfesten Friktionsschicht (60) versehen ist, die in Kontakt mit dem Rotor (6) tritt.

6. Piezoelektrischer Motor nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Friktionsschicht (60) vollständig aus einem Material besteht, das eine chemische Verbindung mit der piezoelektrischen Keramik bildet, z. B. Glas, Metall oder ein anderes Material.

7. Piezoelektrischer Motor nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Friktionsschicht (60) aus einer Grund- und einer Zwischenschicht besteht, wobei die Grundschicht (63) die Friktionseigenschaften bestimmt und die Zwischenschicht (64) eine chemische Verbindung mit der Piezokeramik und der Grundschicht bildet.

8. Piezoelektrischer Motor nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Friktionsschicht (60) aus einem zusammengesetzten Material besteht, dessen Grundlage ein Material bildet, das eine chemische Verbindung mit der Piezokeramik eingeht, und daß als Füllstoff ein Material verwendet wird, das den Reibungskoeffizienten der Friktionsschicht erhöht.

9. Piezoelektrischer Motor nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Friktionsschicht (60) aus einem porösen Material mit hohen Reibungskoeffizienten besteht, wobei die Poren dieses Materials mit einem anderen Material angefüllt sind, das eine chemische Verbindung mit Piezokeramik bildet.

10. Piezoelektrischer Motor nach Anspruch 1 und 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Erregerquellen (18, 19) der zwei Zusatzgeneratoren (10, 11) Leistungsverstärker (80, 83, 84) darstellen, die über eine Phasenschieberkette (81, 82) mit der Erregerquelle (17) des Grundgenerators (9) verbunden sind.

11. Piezoelektrischer Motor nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß die Erregerquellen (18, 19) der Zusatzgeneratoren (10, 11) mit Vorrichtungen (125, 126) zur Umpolung des Phasenwinkels ausgerüstet sind.

12. Piezoelektrischer Motor nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß die Erregerquelle (17)

des Grundgenerators (9) einen frequenzgesteuerten Spannungsgenerator darstellt.

13. Piezoelektrischer Motor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Grundgenerator (9) für Stehwellen und seine Erregerquelle (17) einen positiven Rückkopplungsweig (87) haben und zusammen einen elektromechanischen Autogenerator bilden.

14. Piezoelektrischer Motor nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, daß der positive Rückkopplungsweig (87) mit einem Impedanzelement (92) verbunden ist, welches in Reihe mit dem Grundgenerator (9) für Stehwellen geschaltet ist.

15. Piezoelektrischer Motor nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, daß der positive Rückkopplungsweig (87) an einen Stromwandler (131) angeschlossen ist, der in Reihe mit dem Grundgenerator (9) für Stehwellen geschaltet ist.

16. Piezoelektrischer Motor nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, daß der positive Rückkopplungsweig (87) mit einer Rückkopplungselektrode (95) verbunden ist, die am Ort der maximalen mechanischen Spannungen der vom Grundgenerator (9) erzeugten Stehwelle angeordnet ist.

17. Piezoelektrischer Motor nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß er mit einem elektronischen Schalter mit Steuereingang ausgerüstet ist, der den positiven Rückkopplungsweig (87) unterbricht.

Hierzu 28 Seite(n) Zeichnungen

30

35

40

45

50

55

60

65

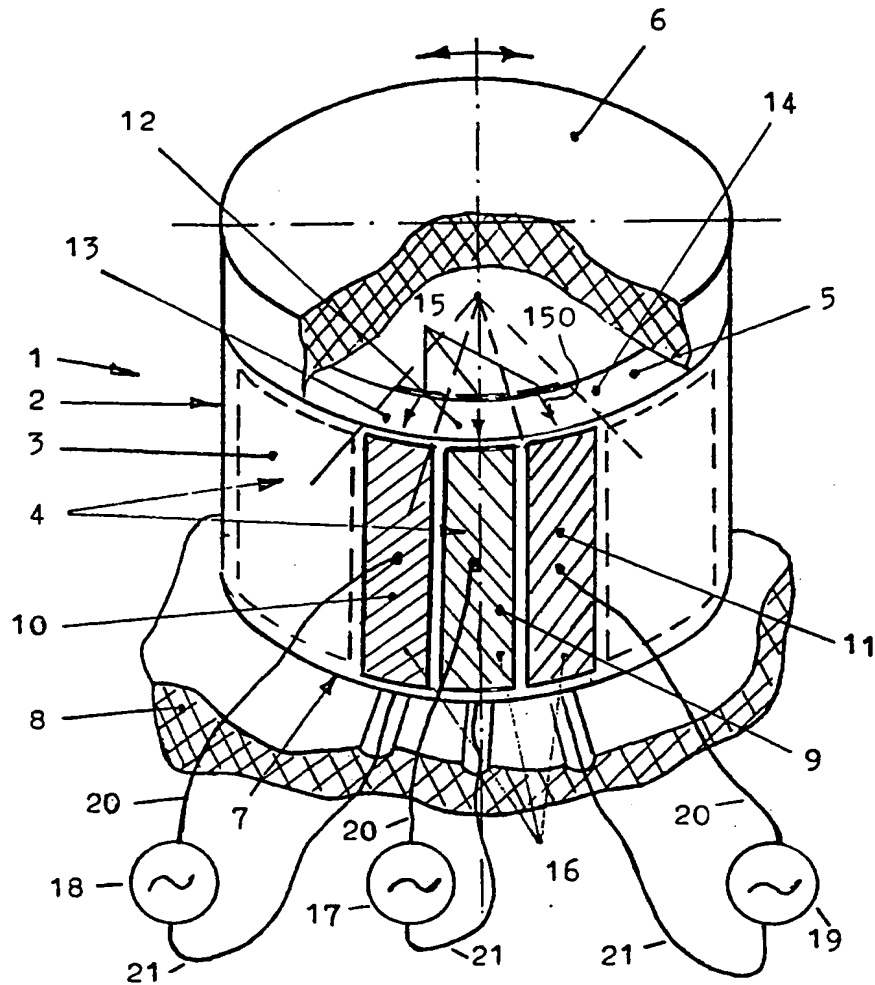


Fig.1



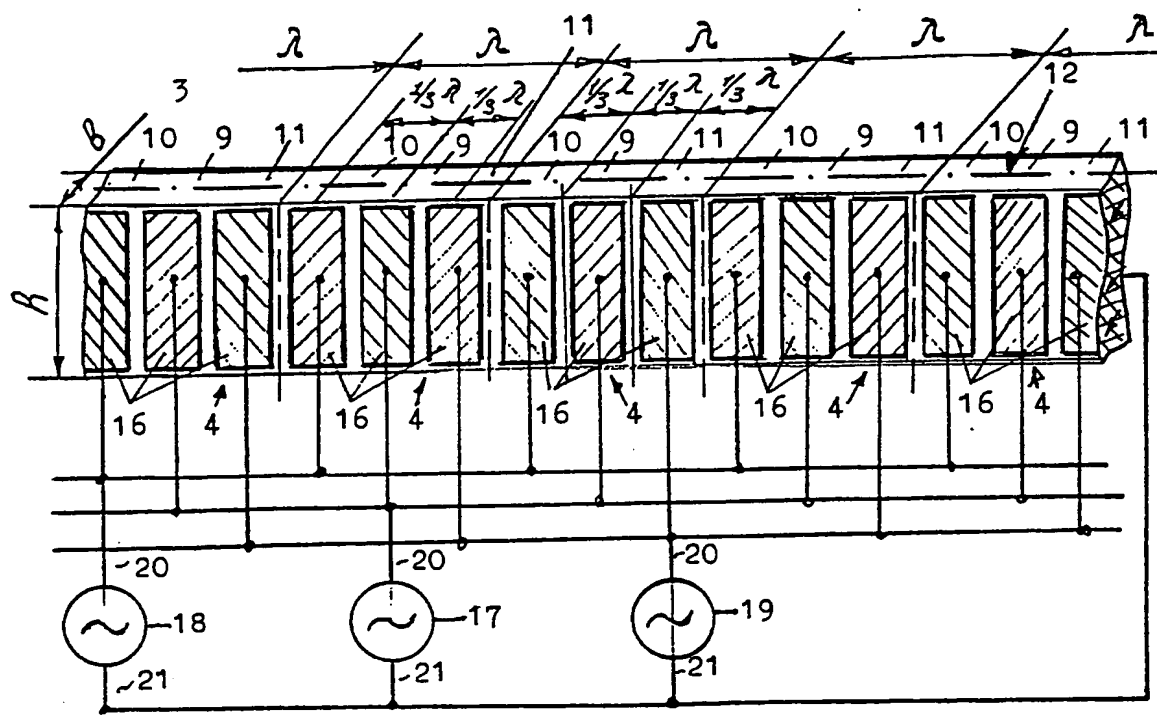


Fig. 2

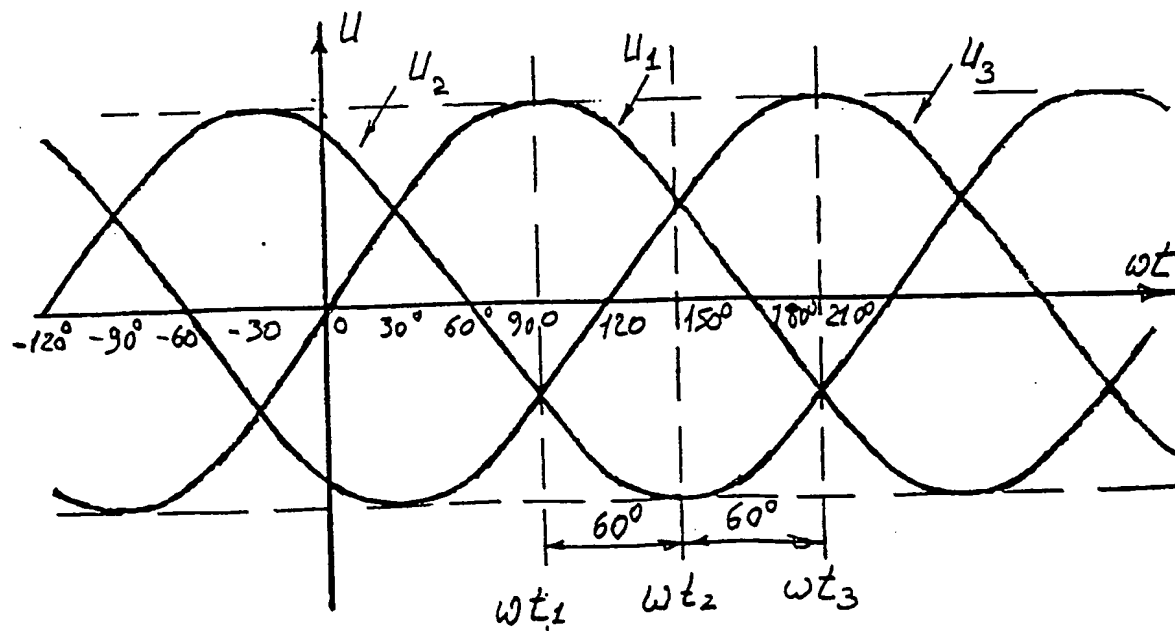


Fig. 3

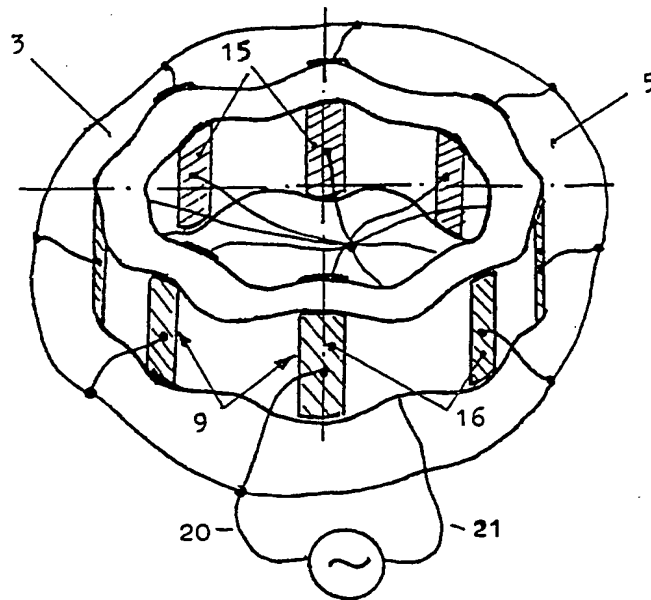


Fig. 4

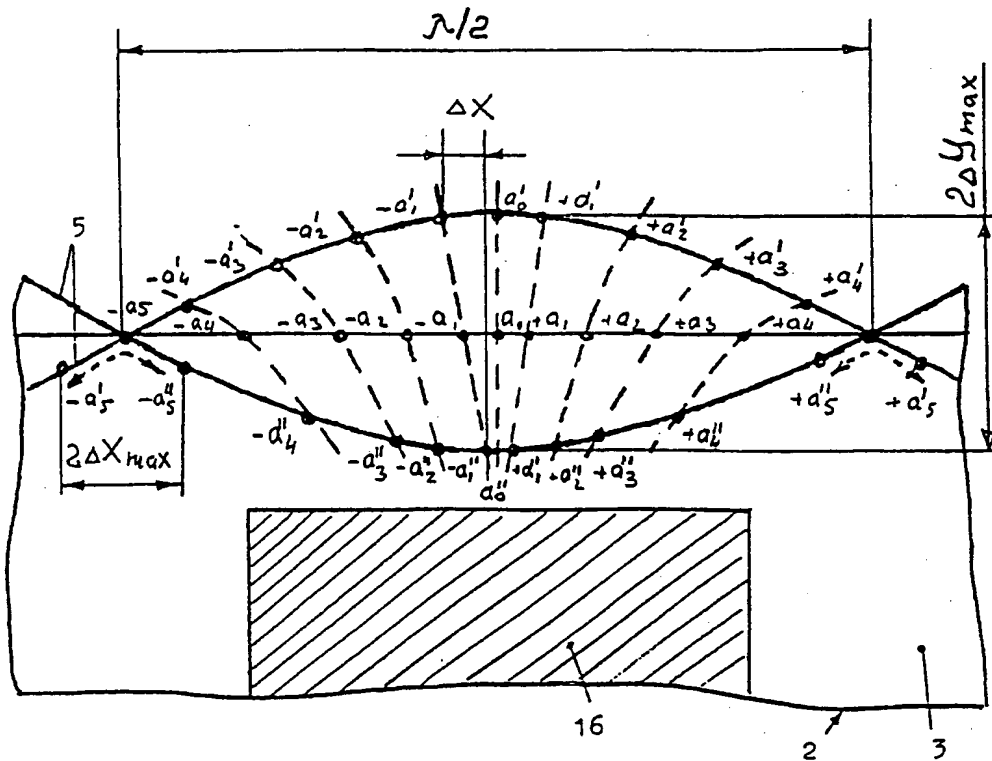


Fig. 8

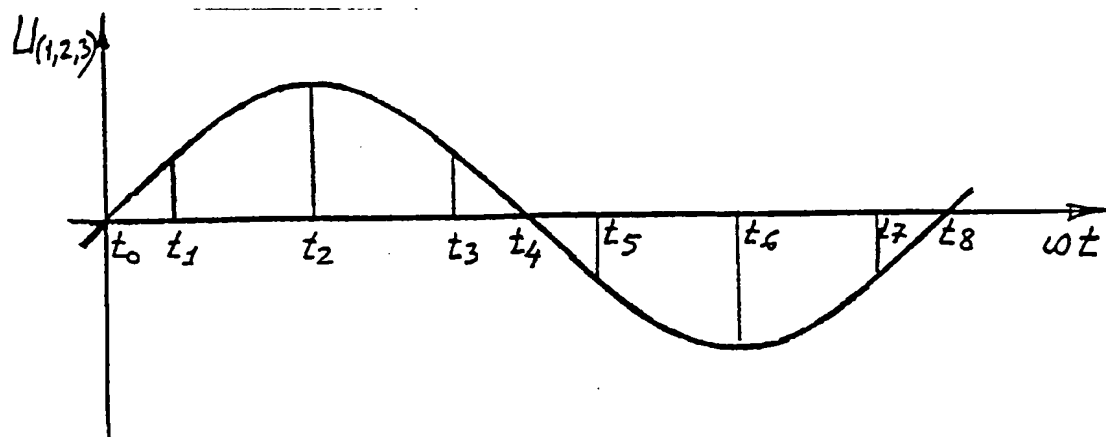


Fig.5

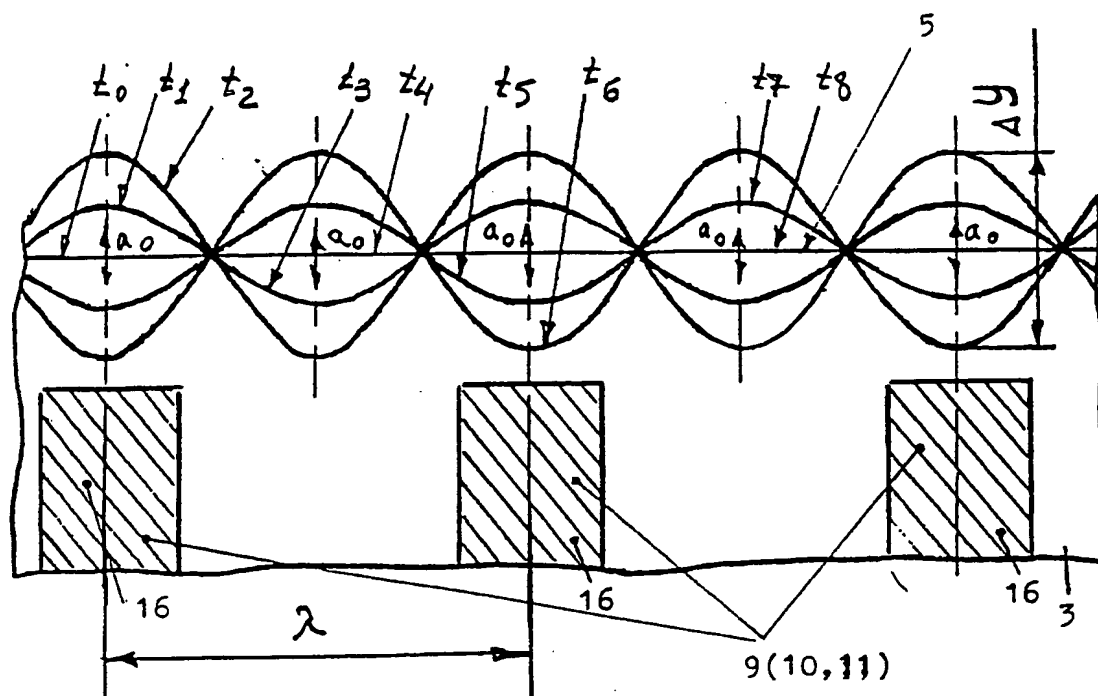
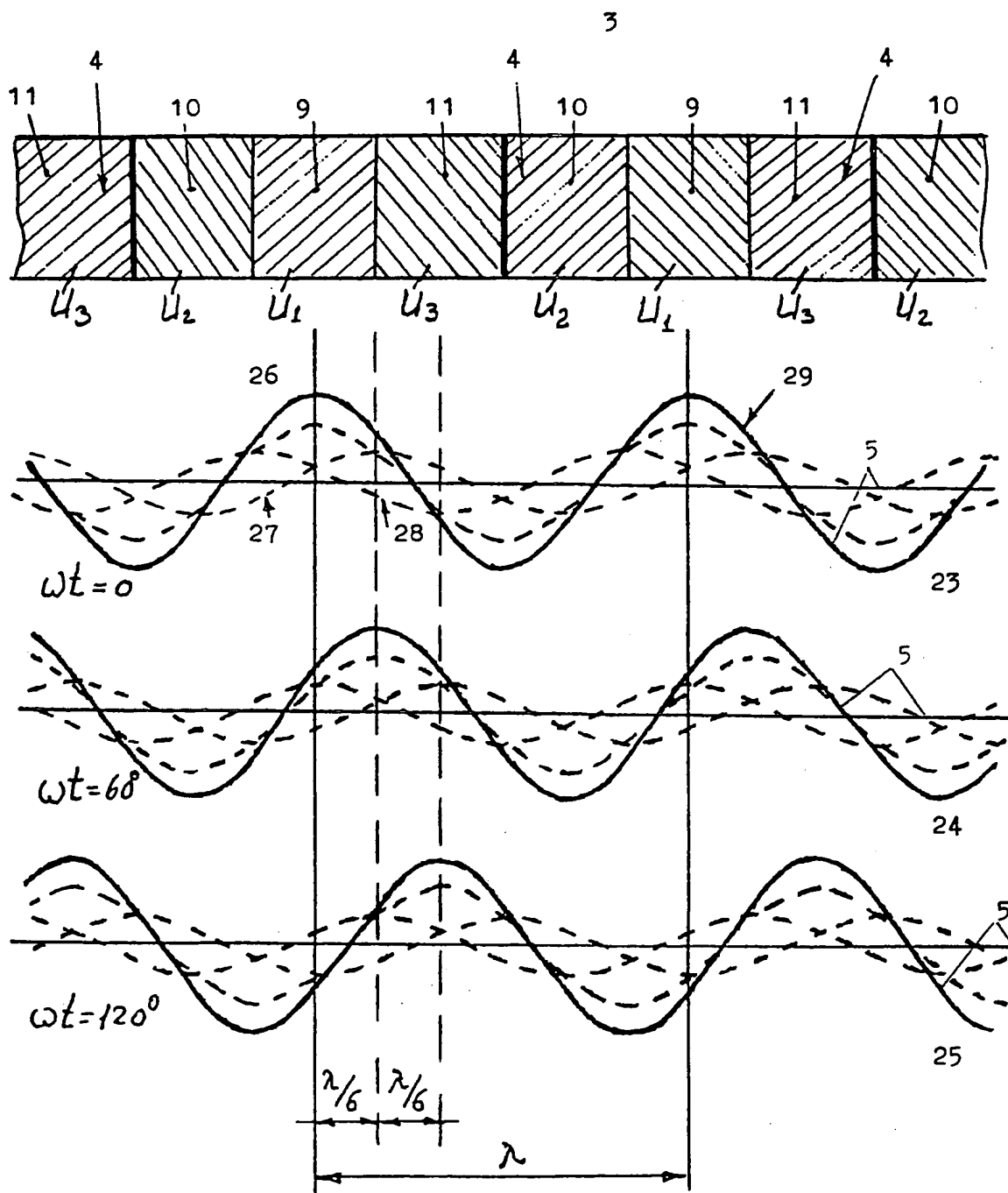
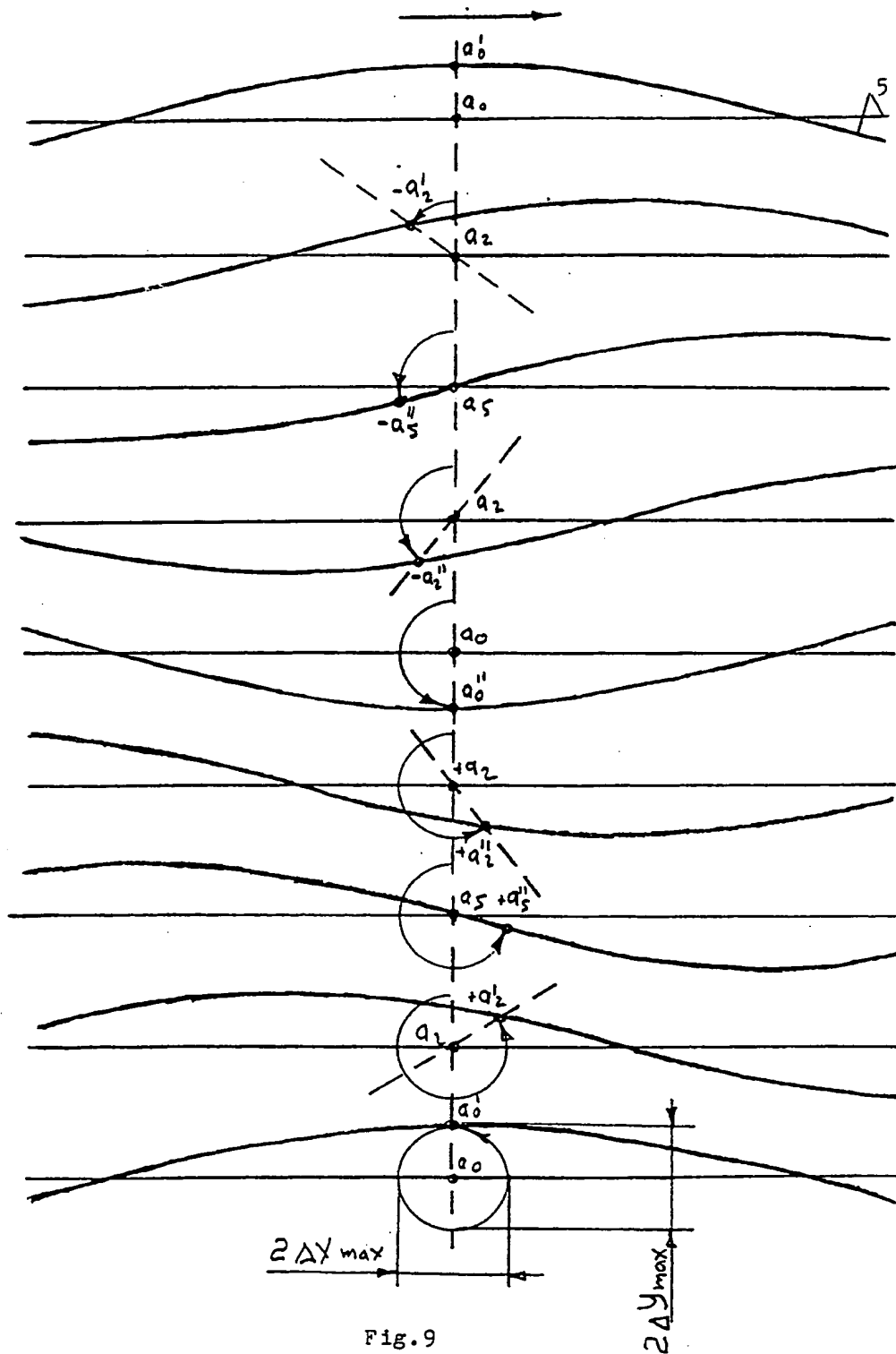


Fig.6





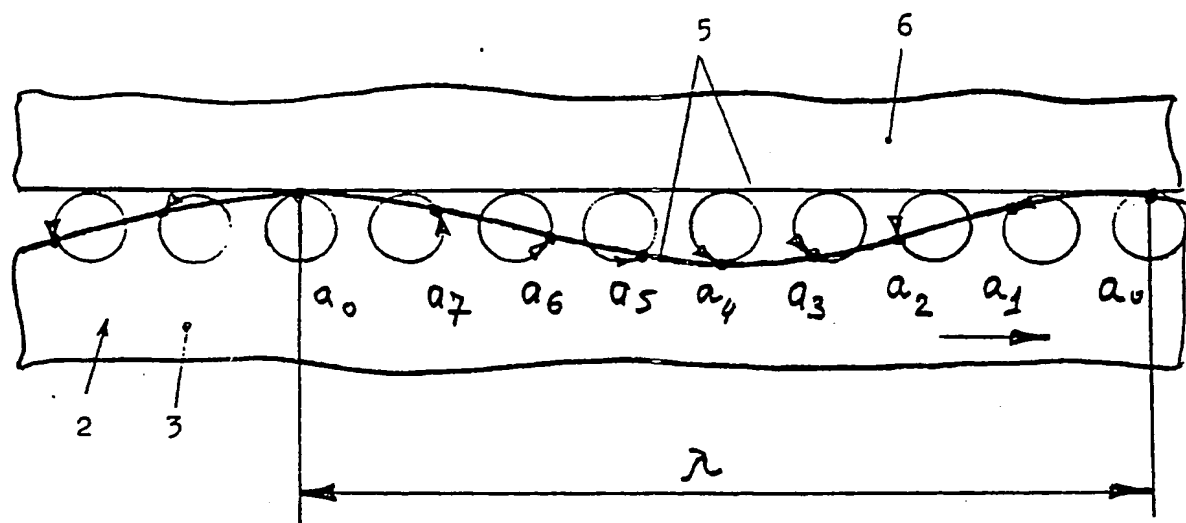


Fig. 10

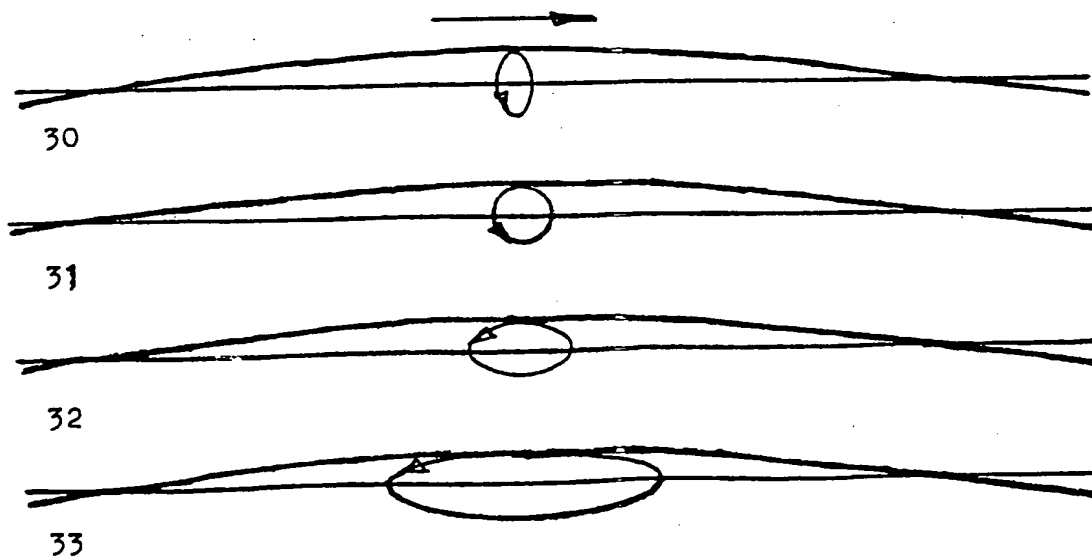


Fig. 11

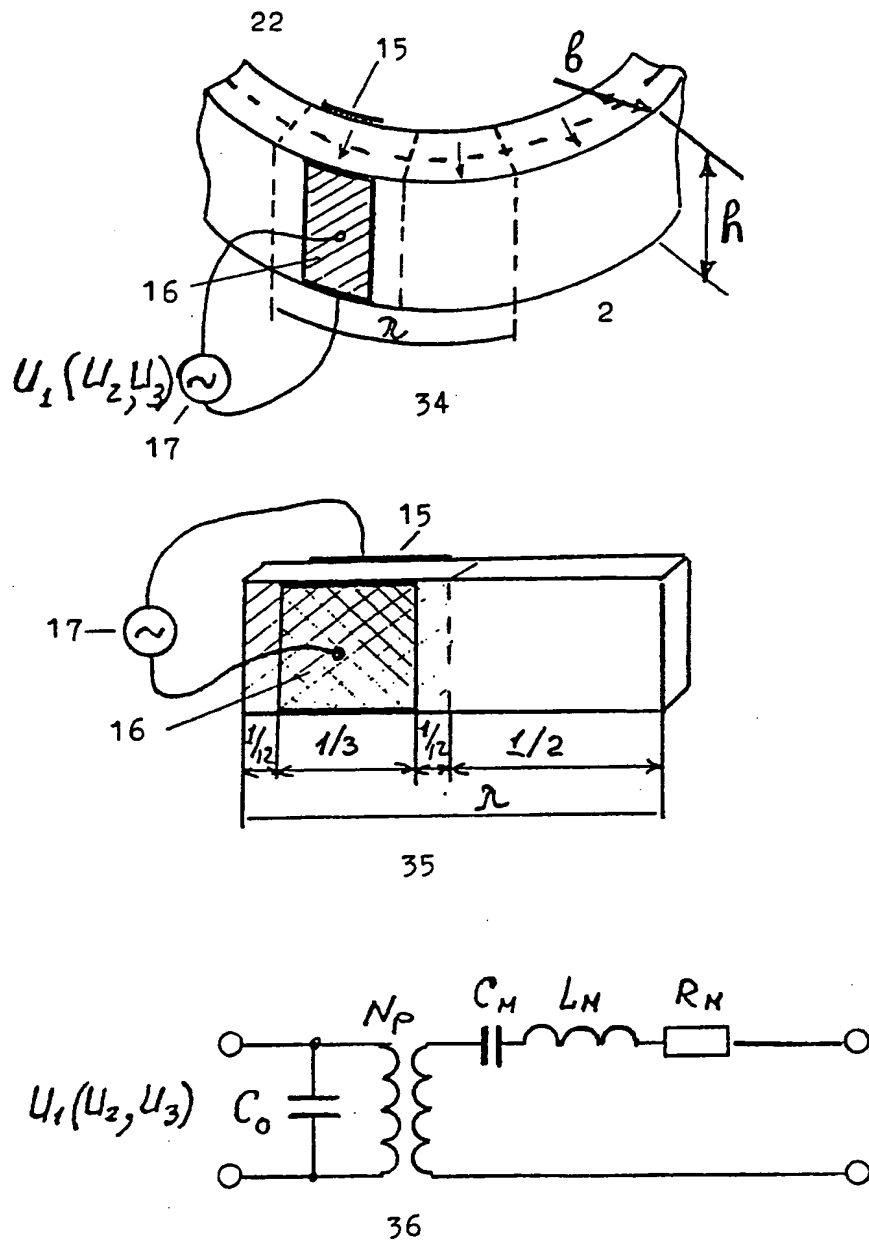


Fig. 12



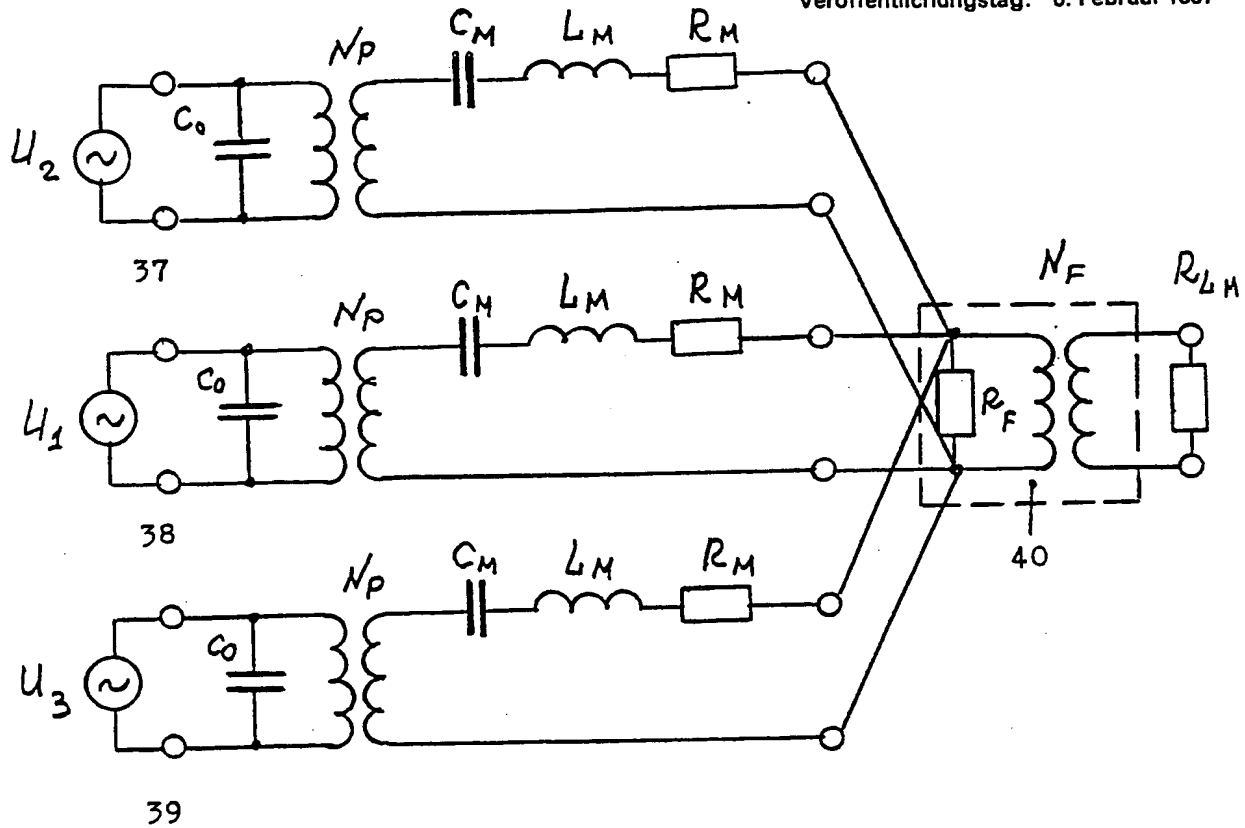


Fig. 13

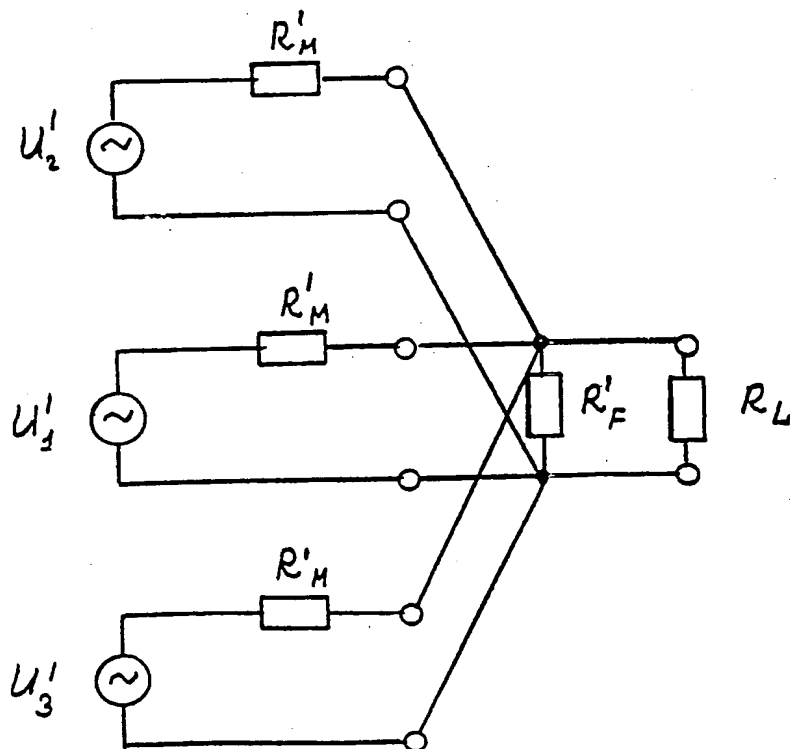


Fig. 14

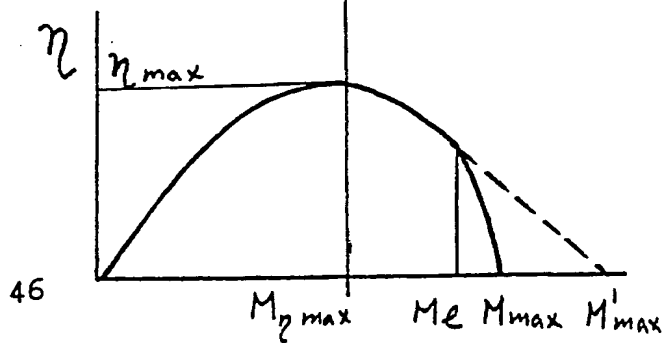
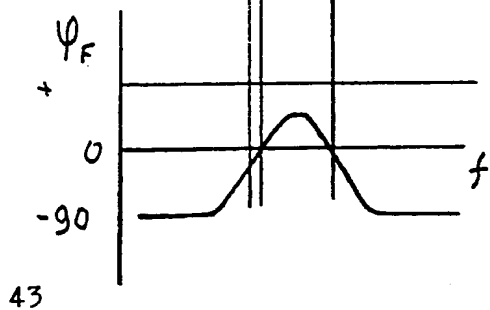
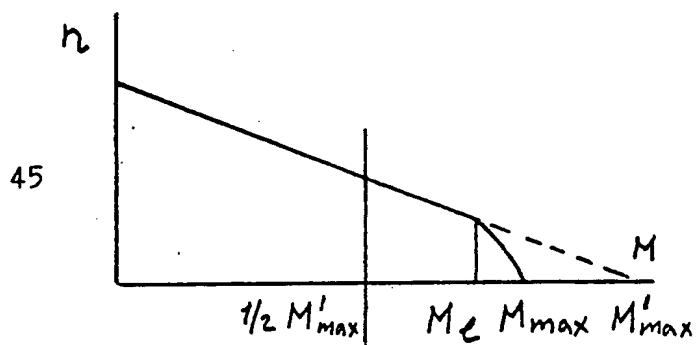
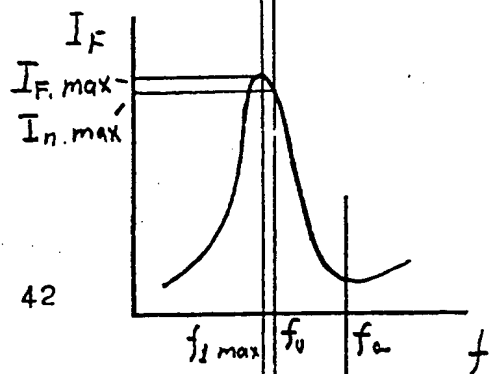
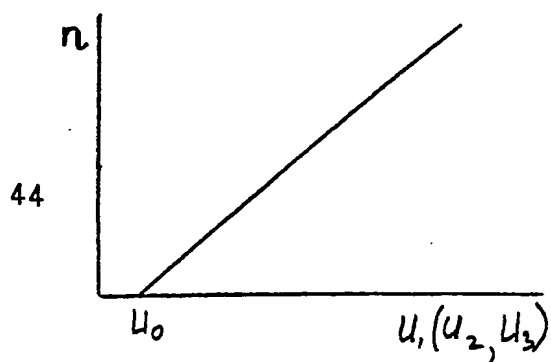
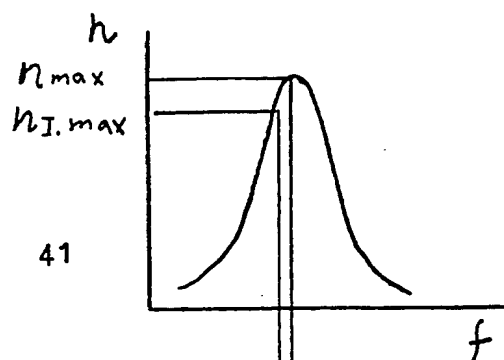


Fig.15

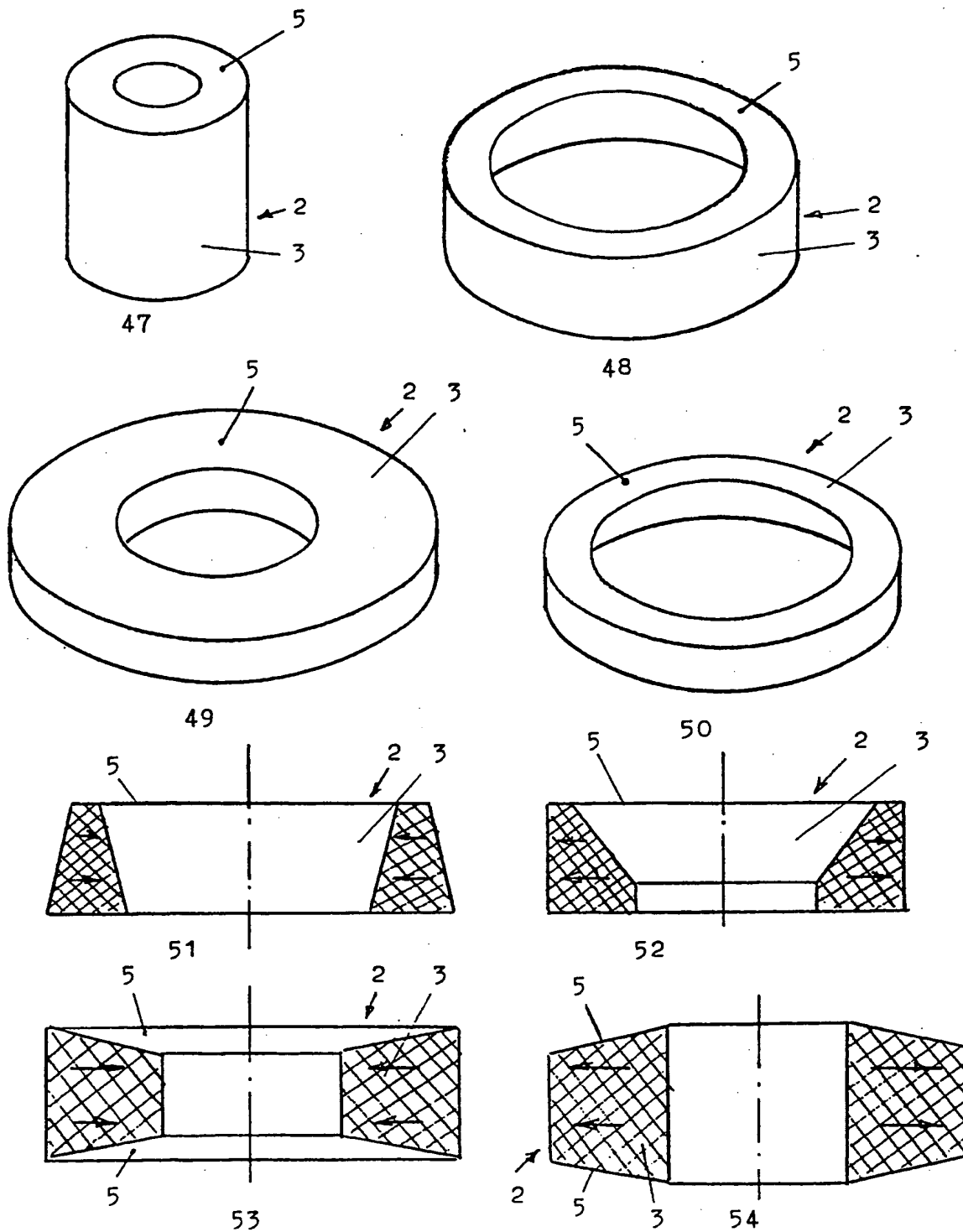


Fig.16

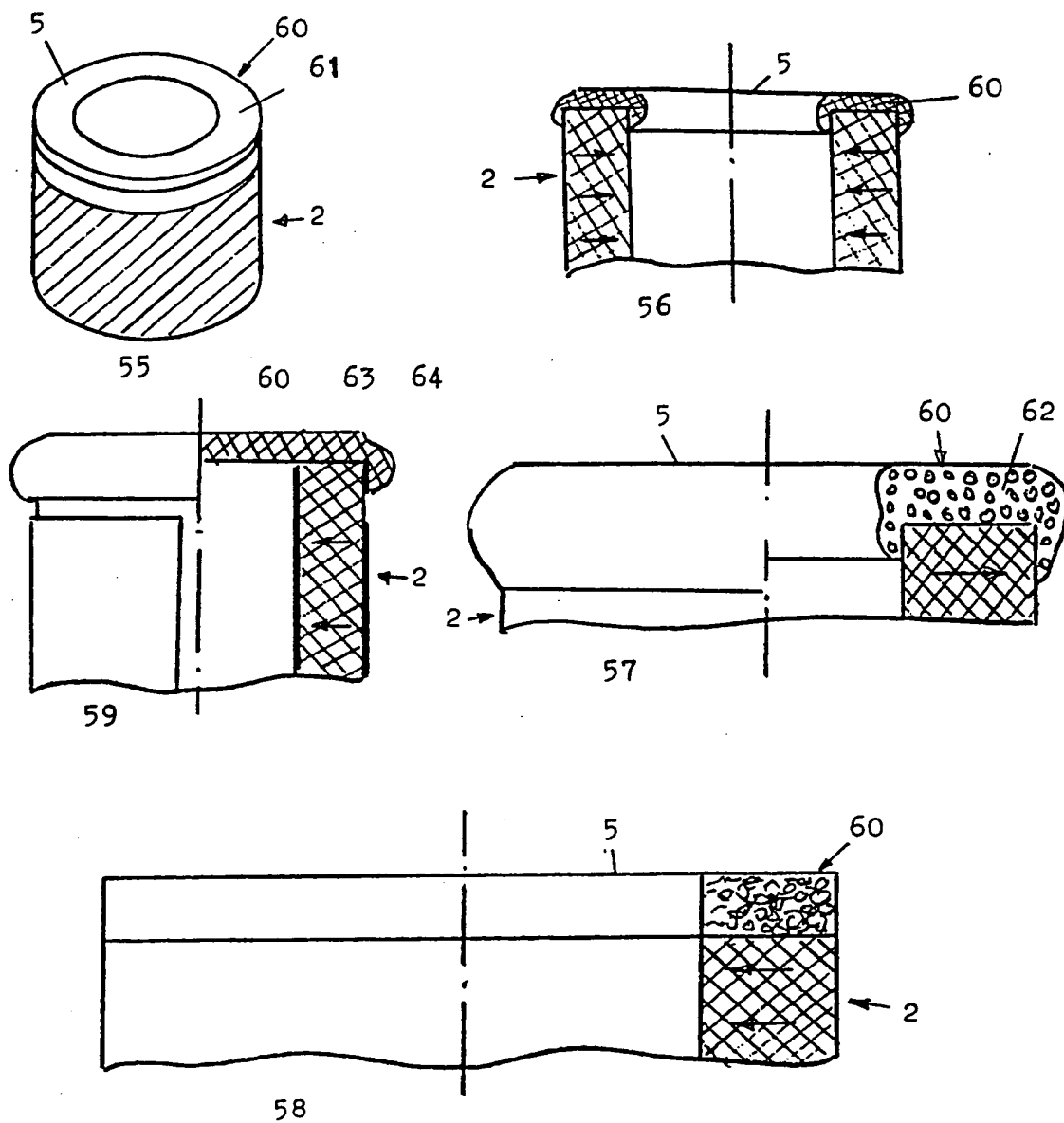


Fig. 17

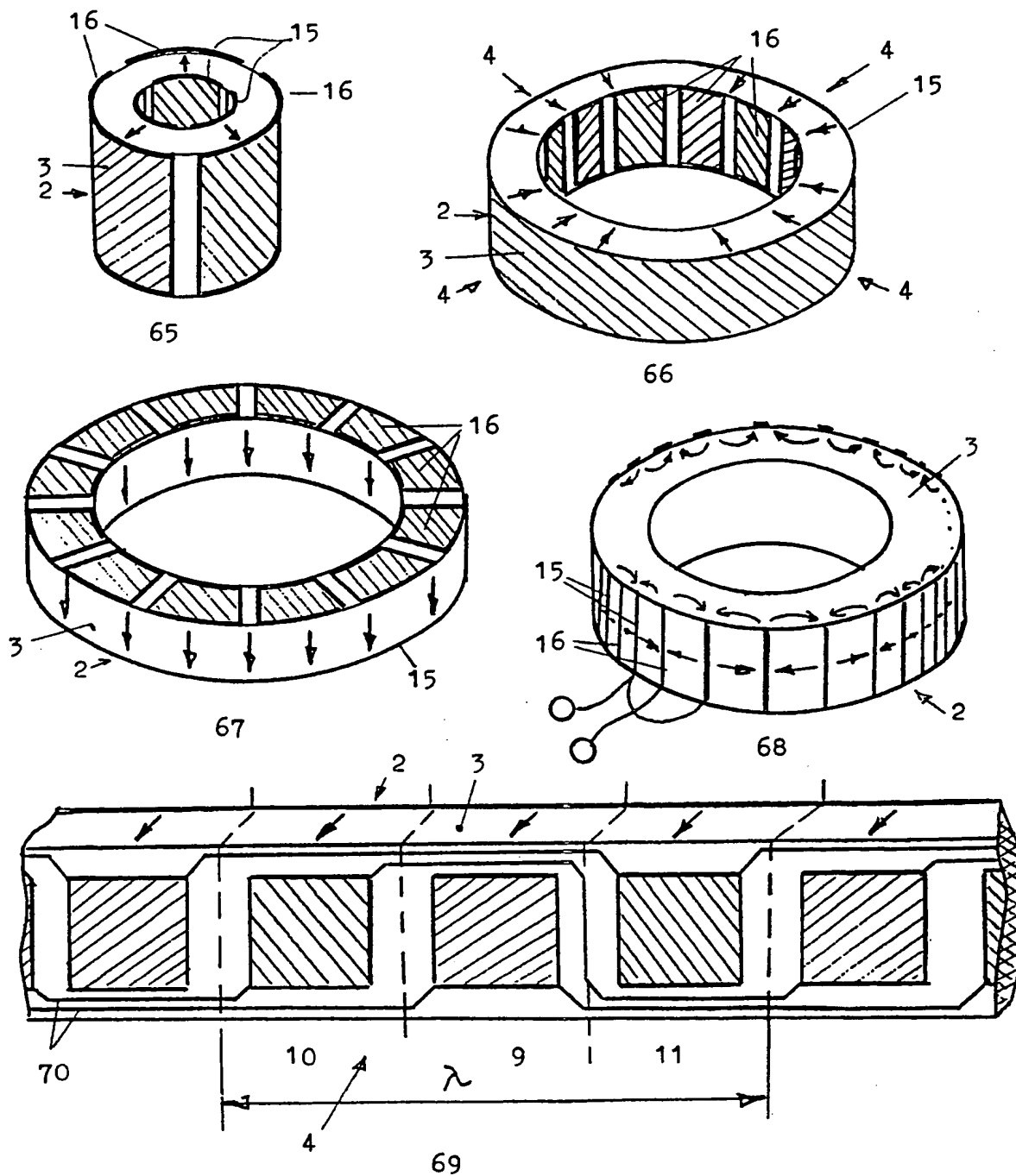


Fig. 18

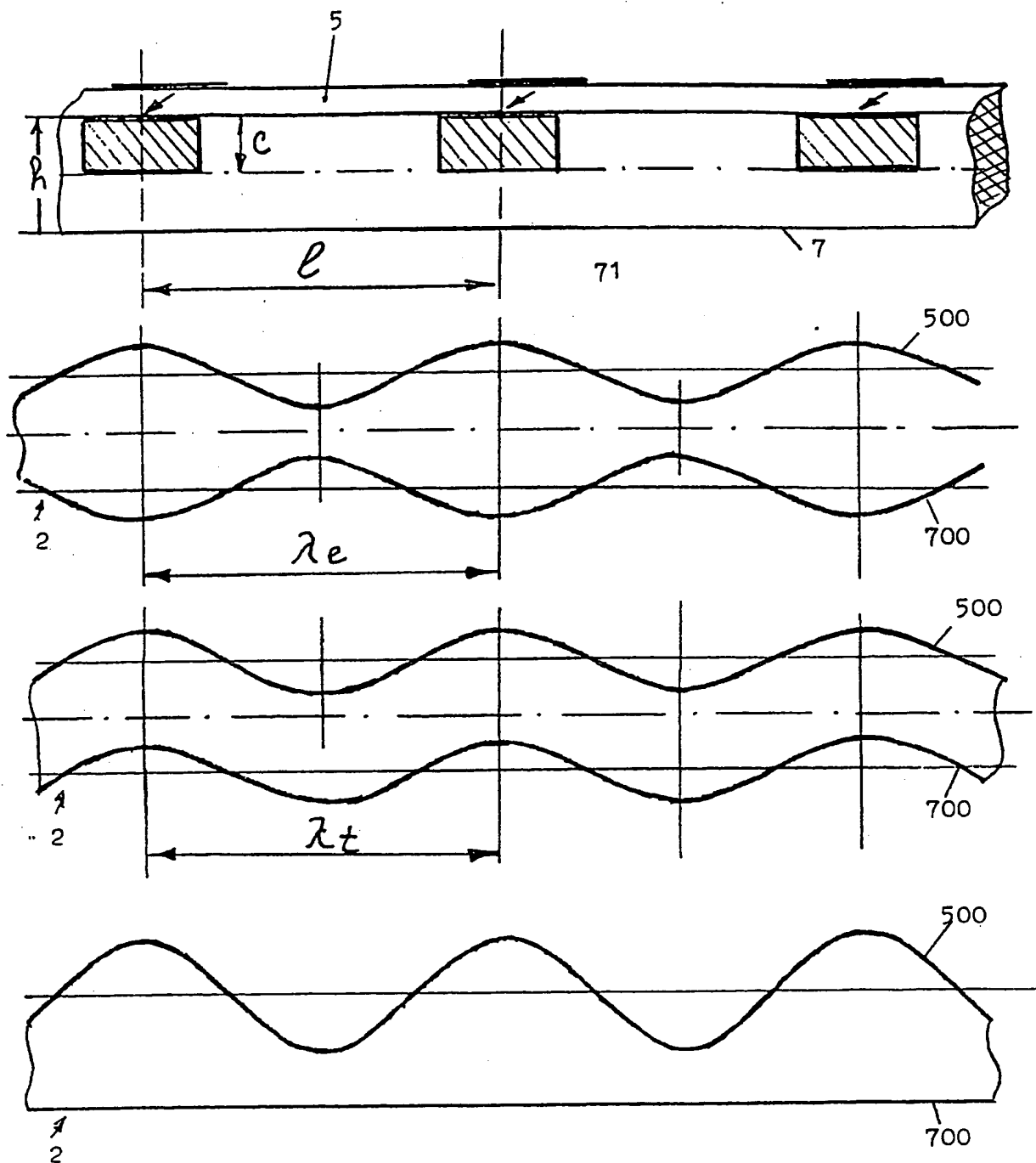


Fig.19

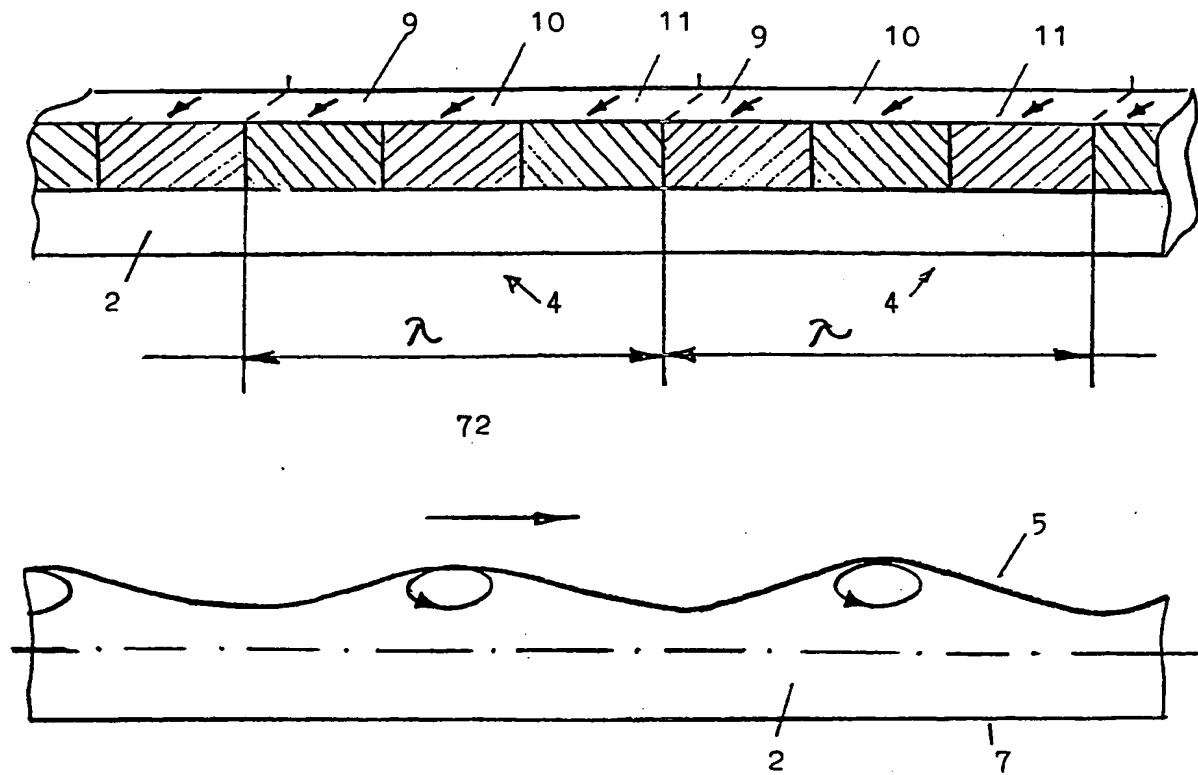


Fig.20



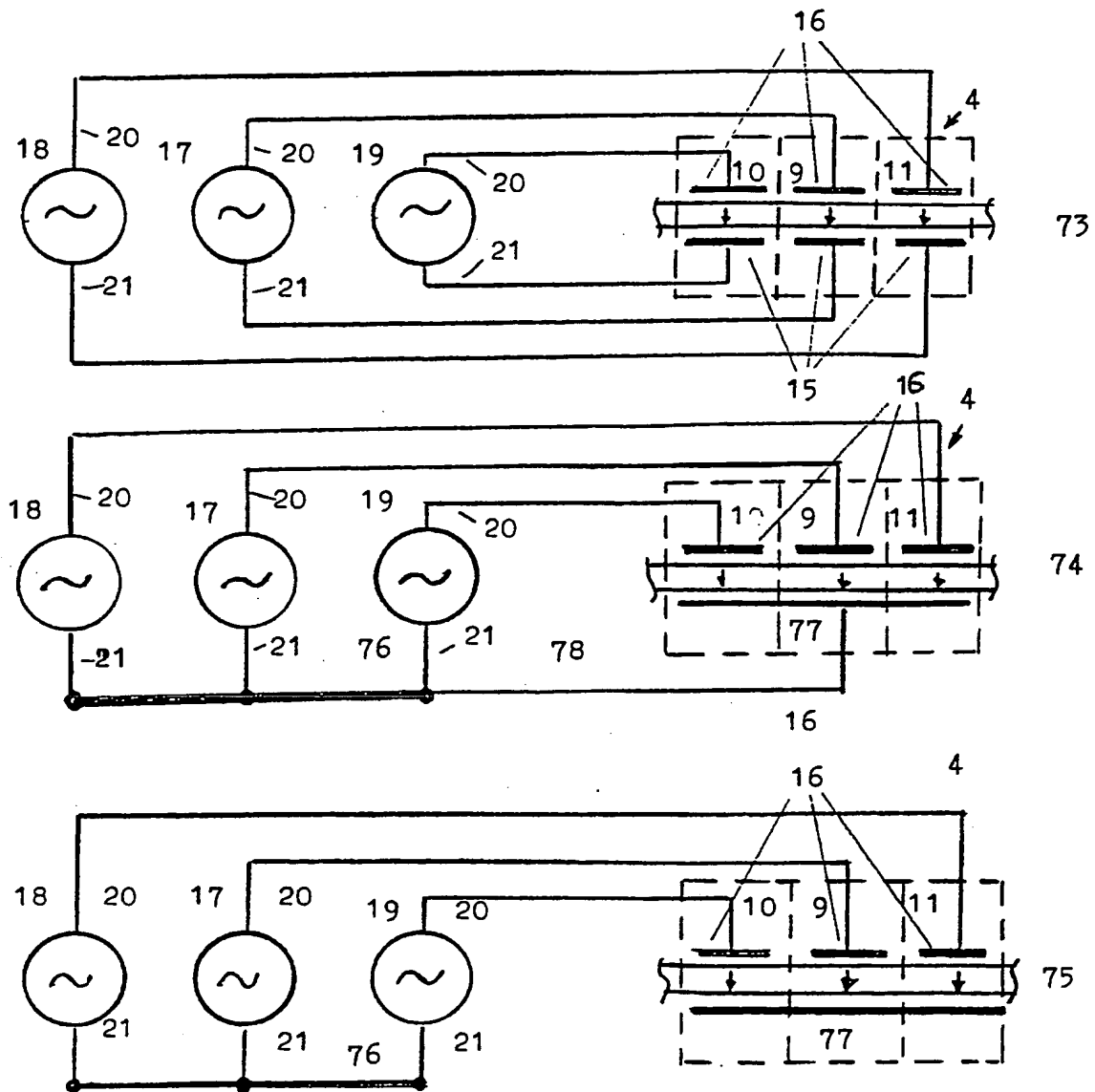


Fig. 21

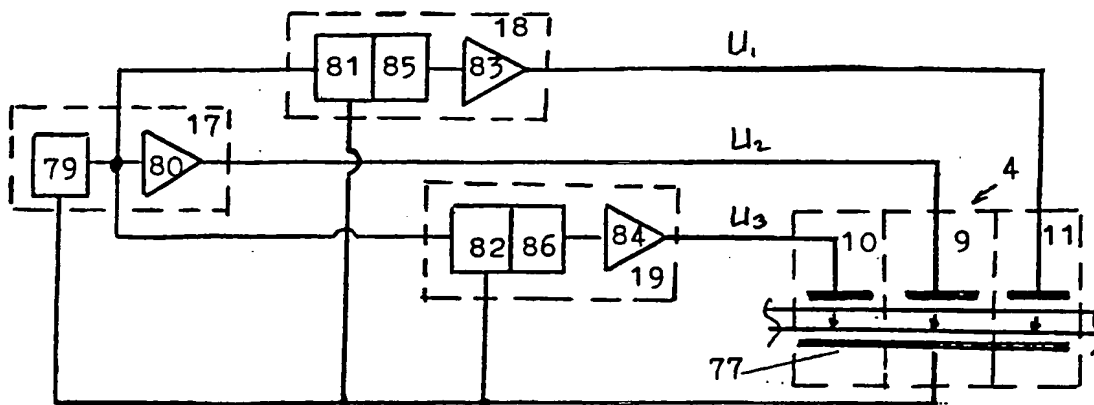


Fig. 22

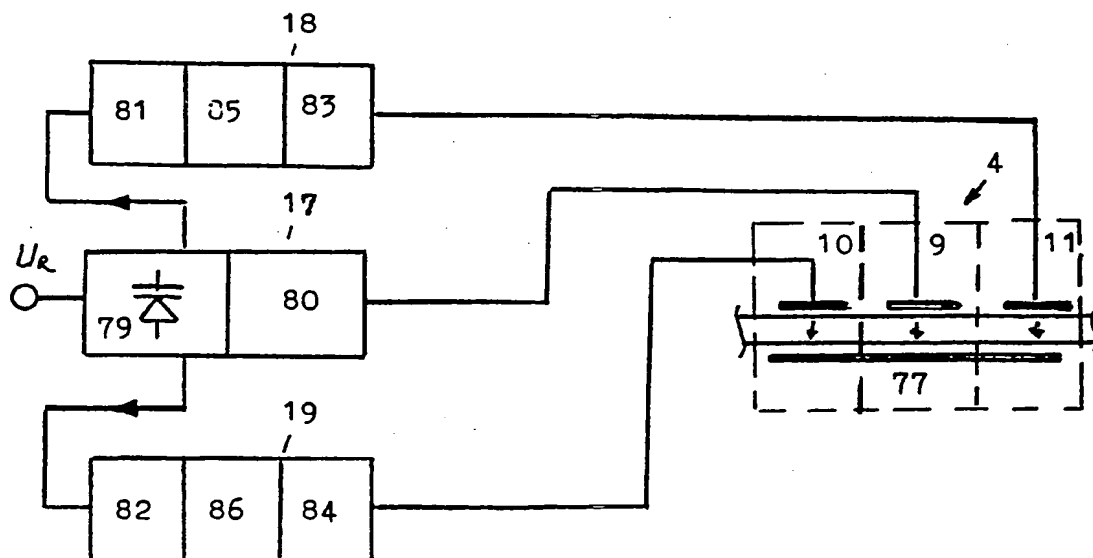


Fig. 23

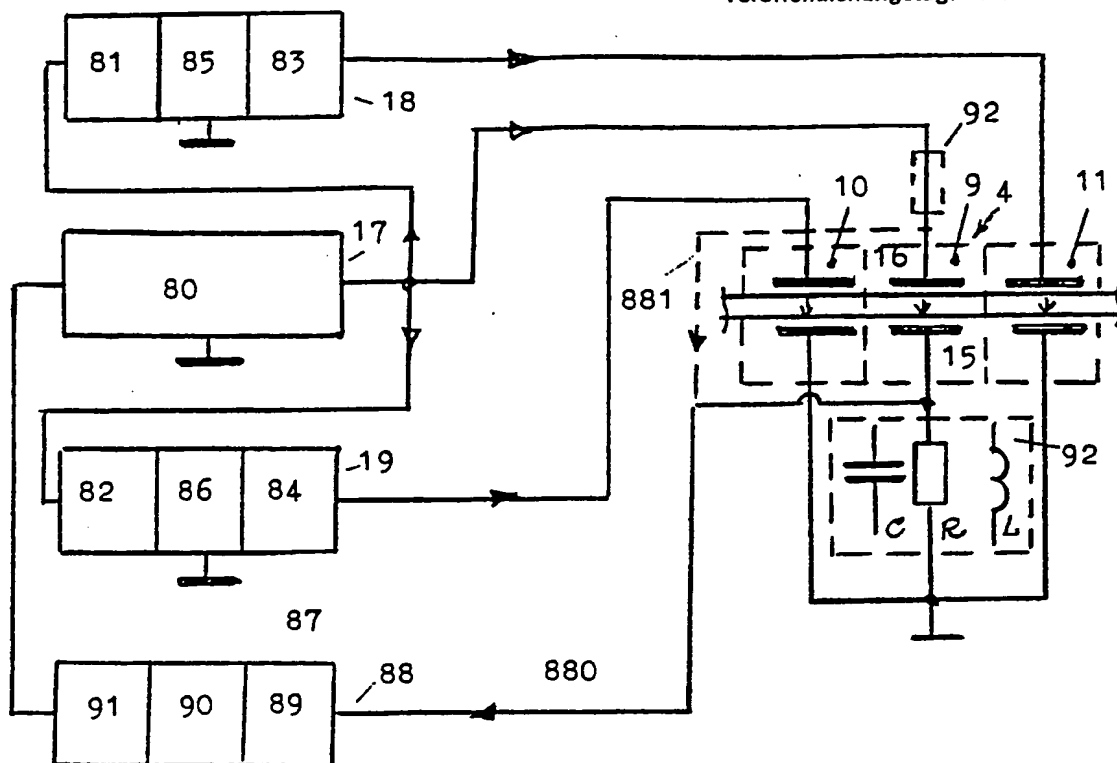


Fig. 24

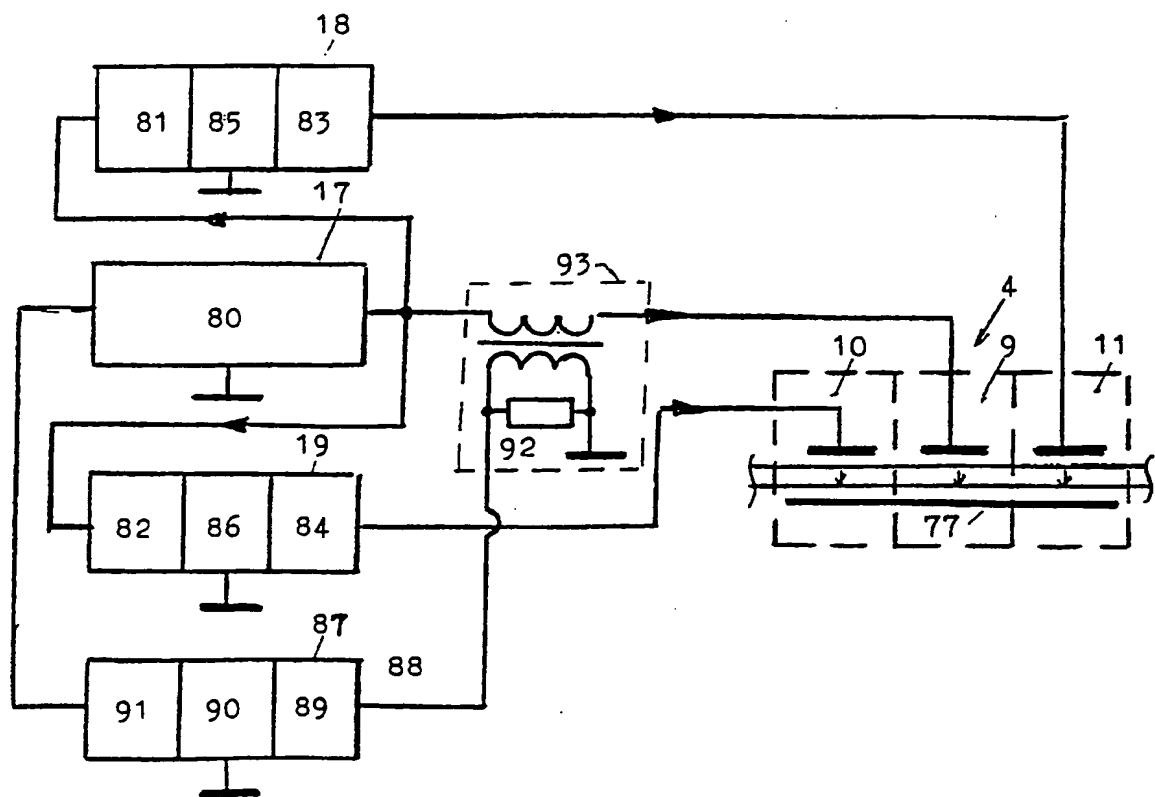


Fig. 25

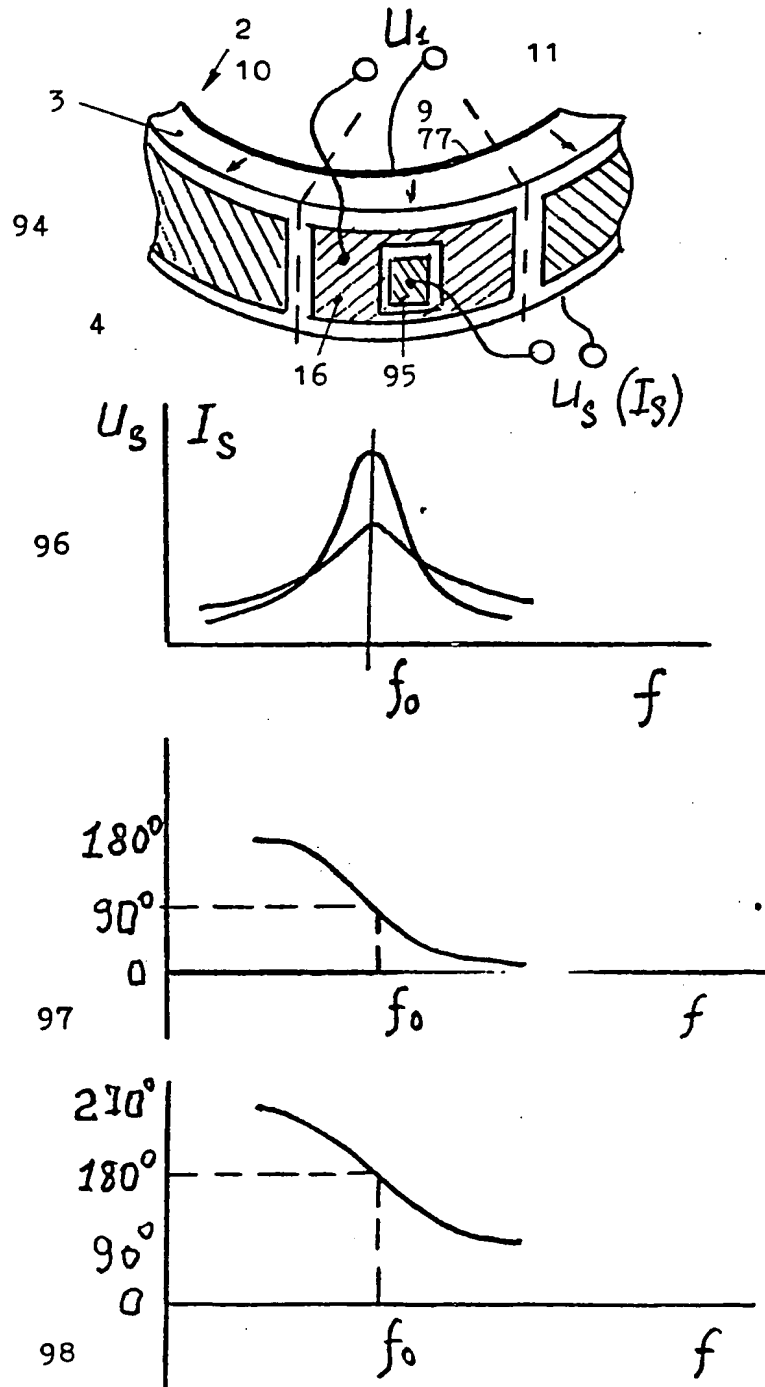


Fig. 26

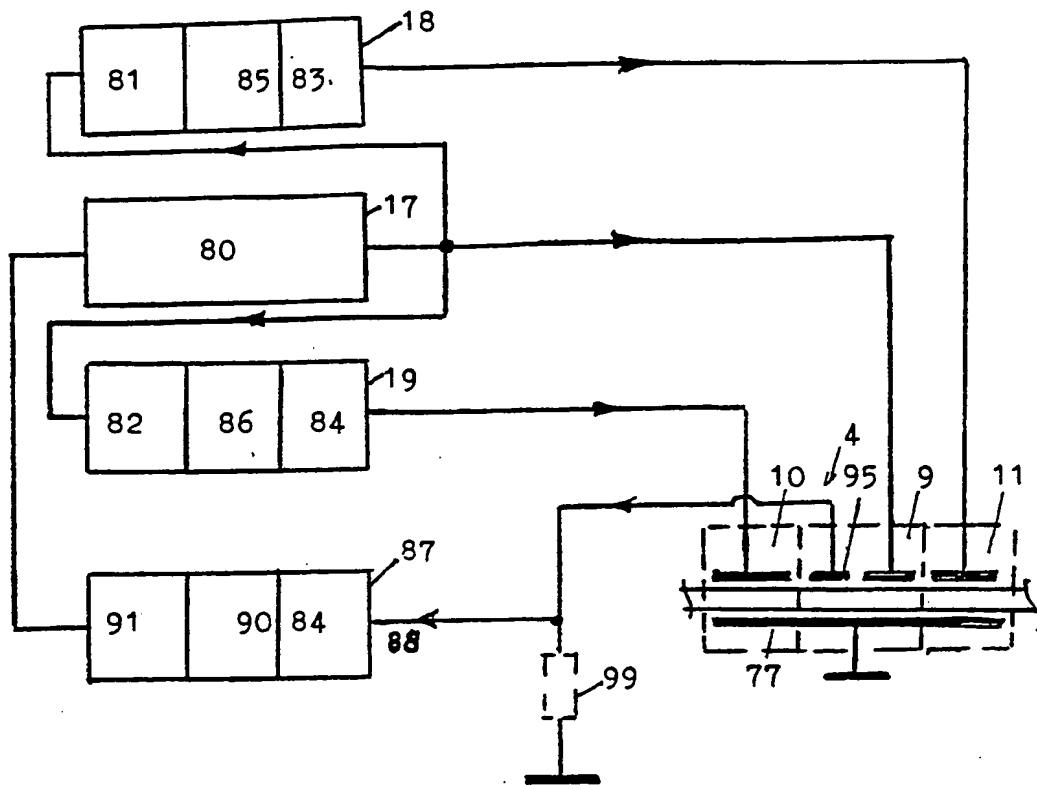


Fig. 27

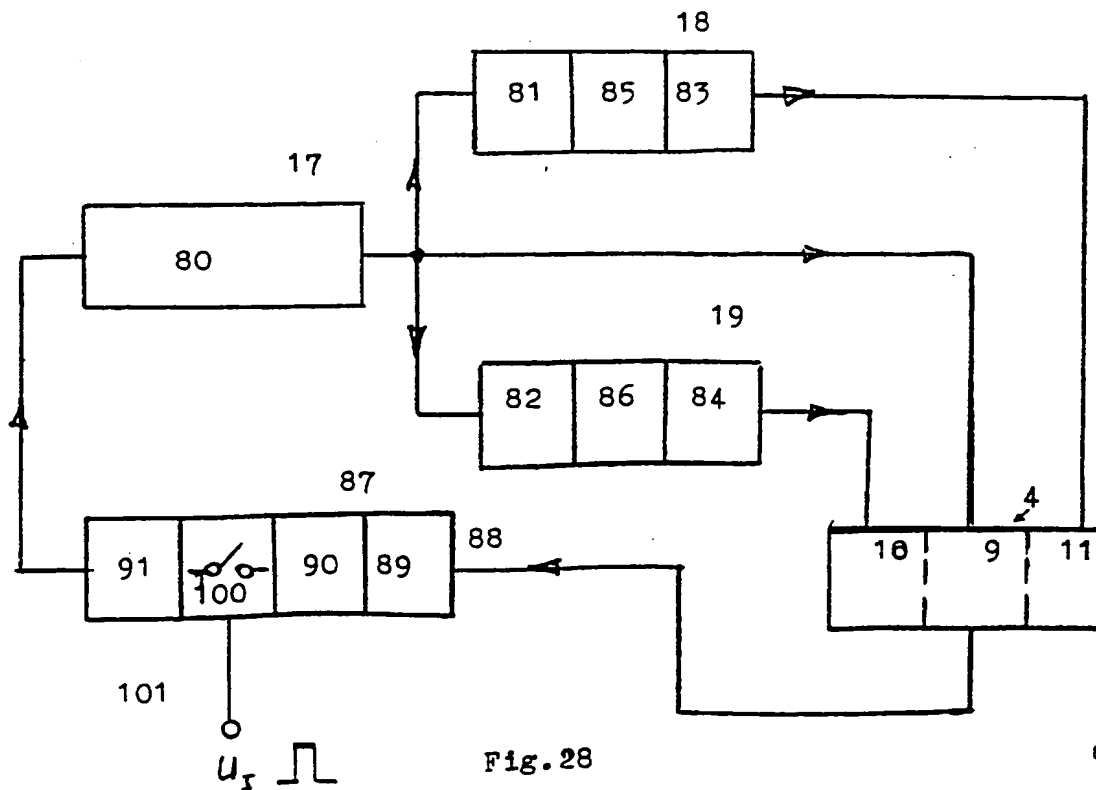


Fig. 28

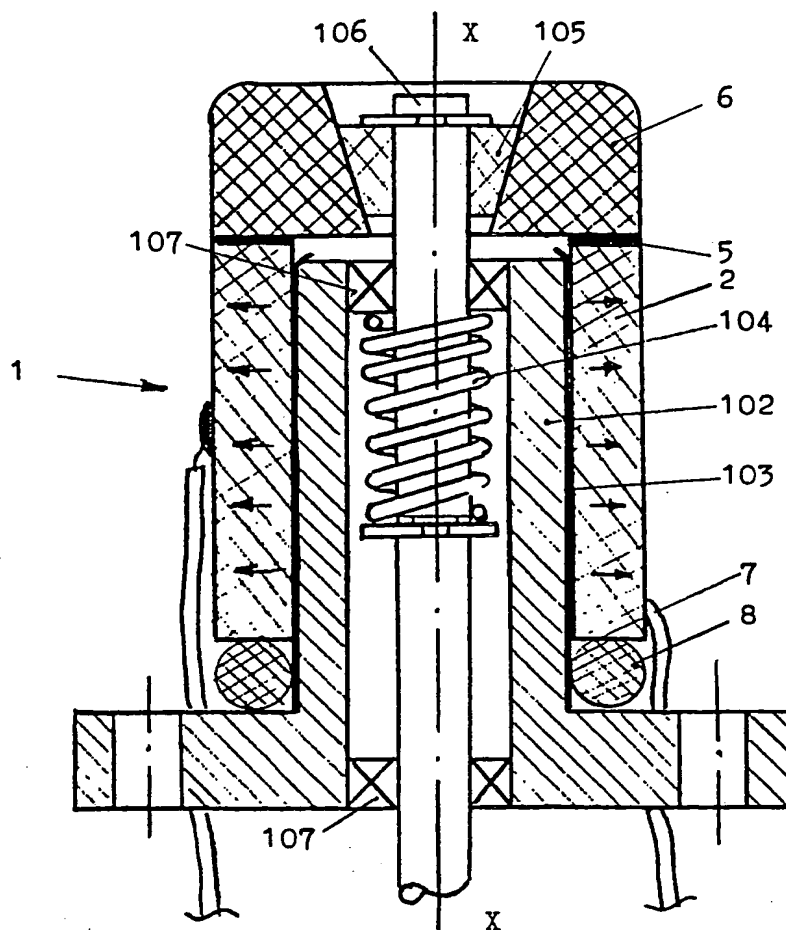


Fig. 29

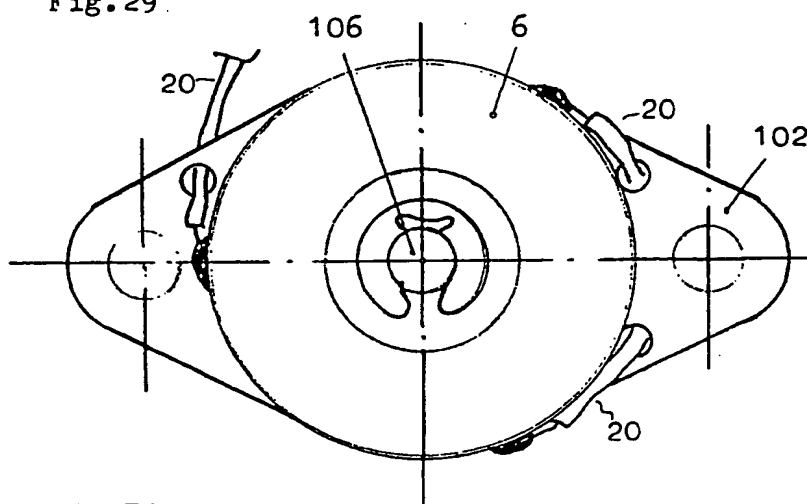


Fig. 30

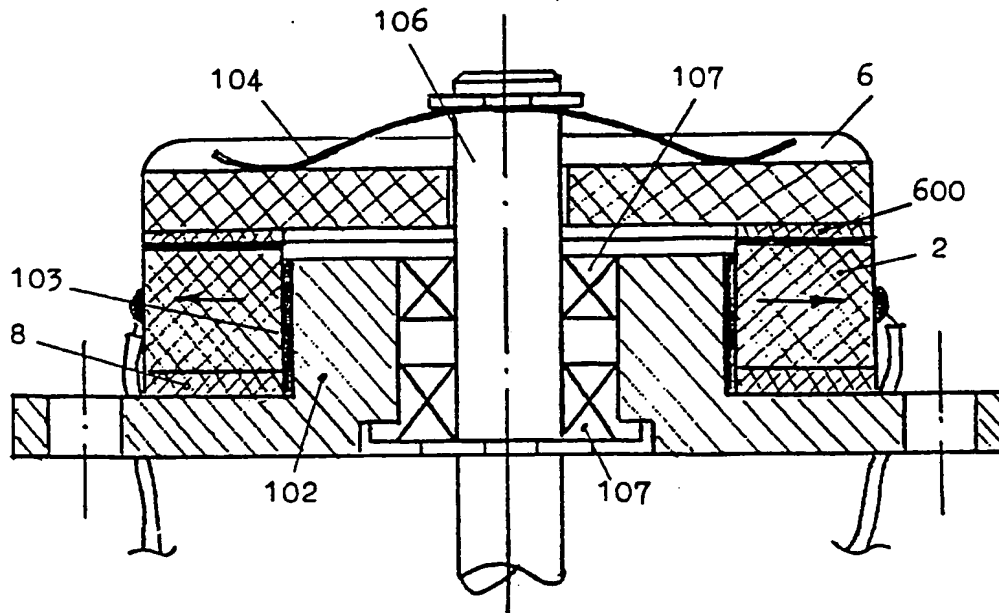


Fig. 31

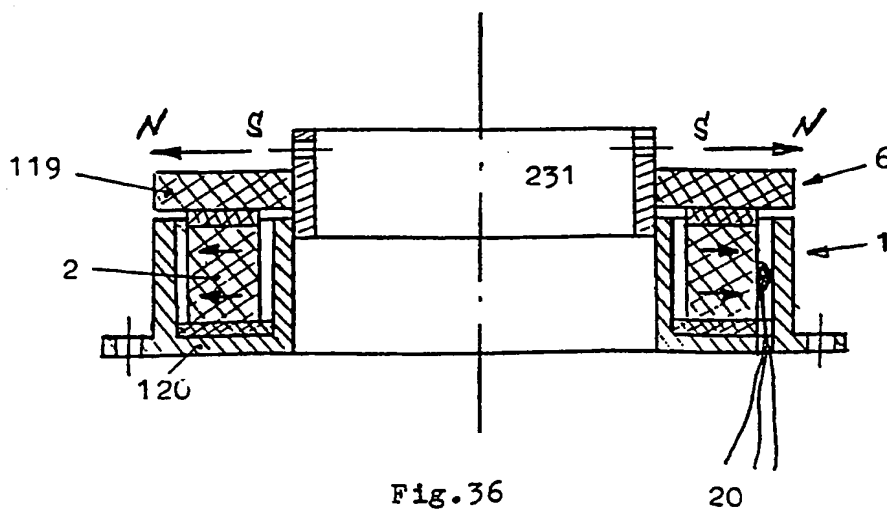


Fig. 36



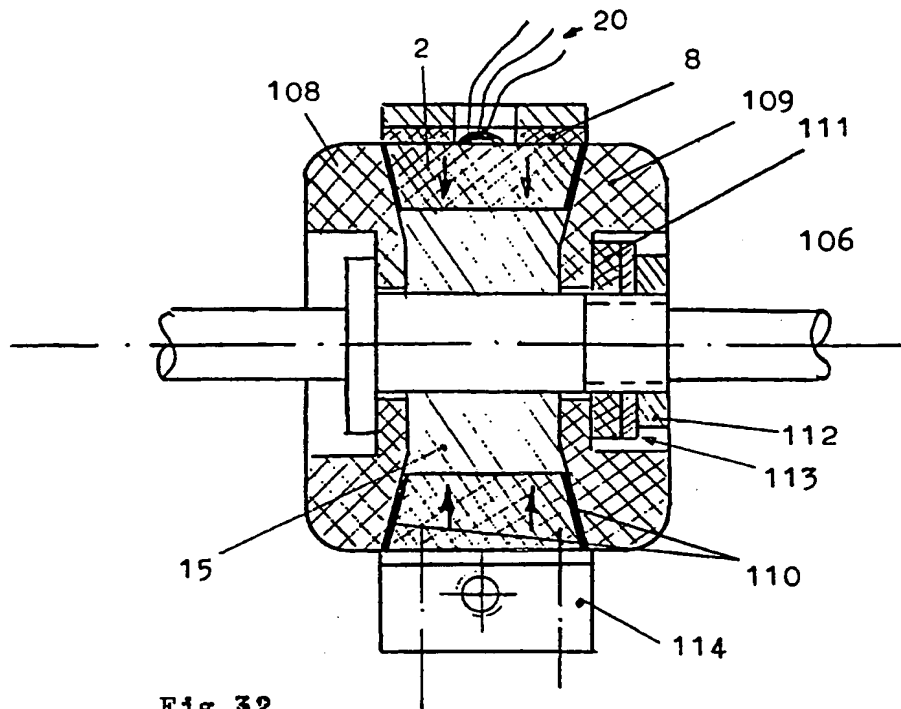


Fig. 32

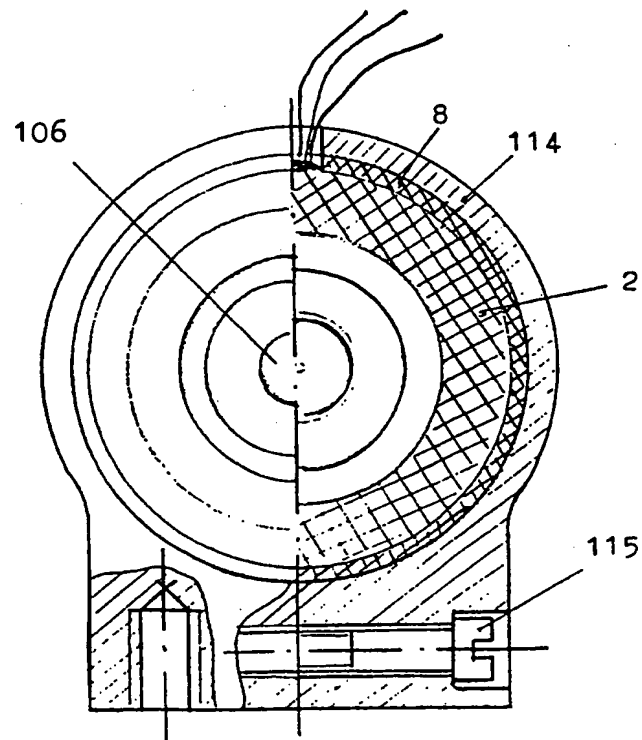


Fig. 33

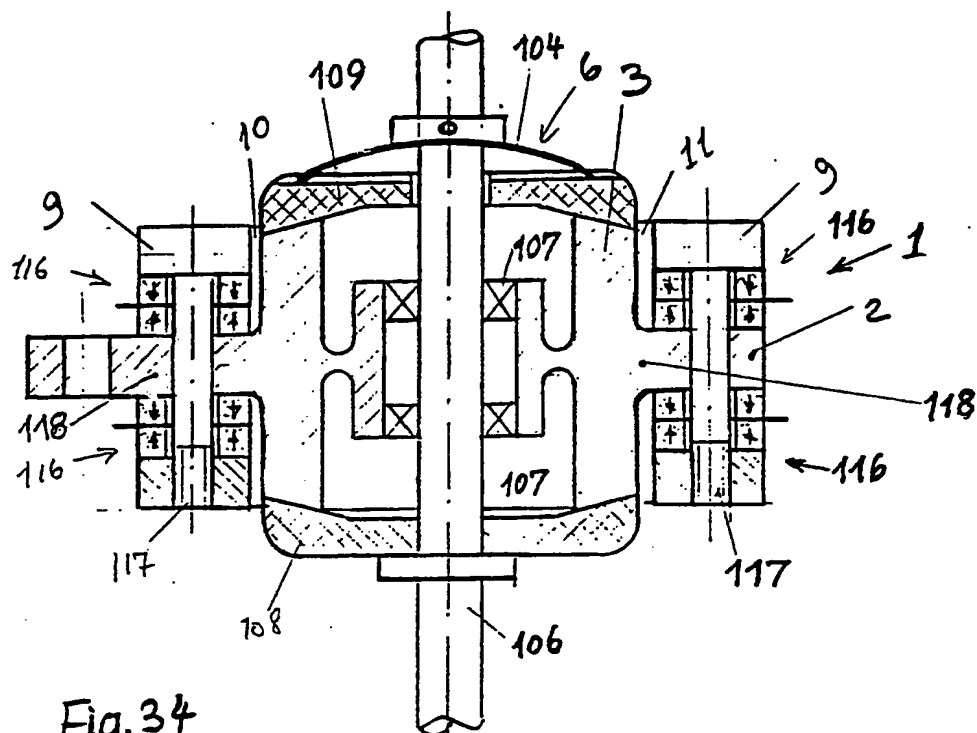


Fig. 34

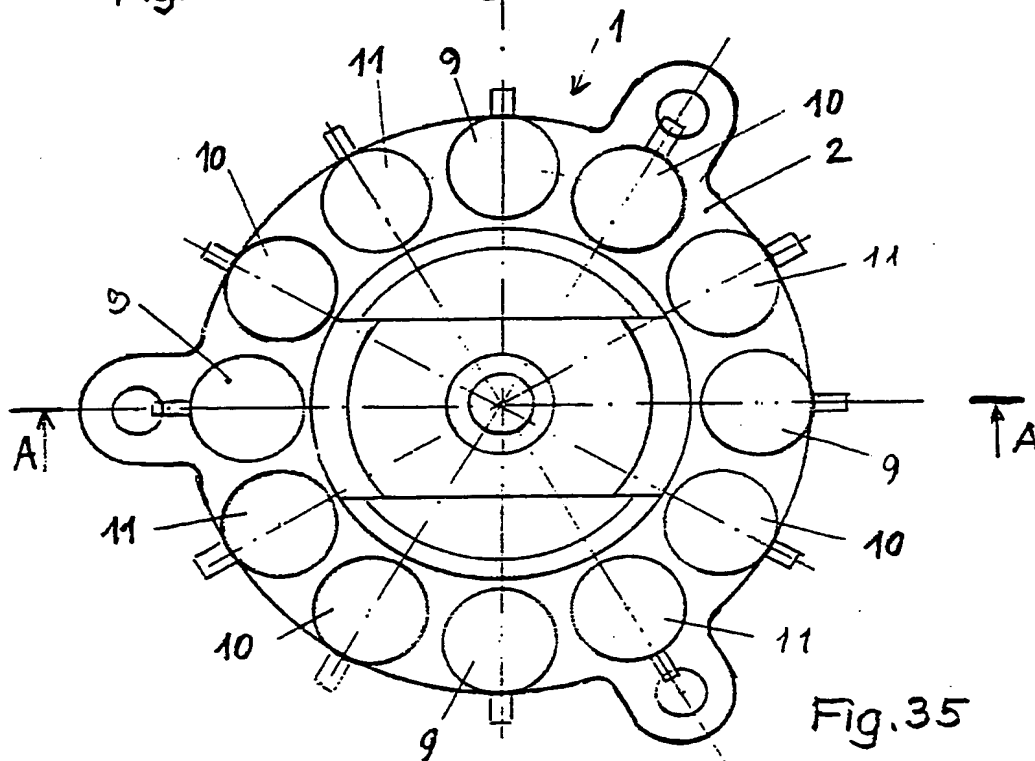


Fig. 35

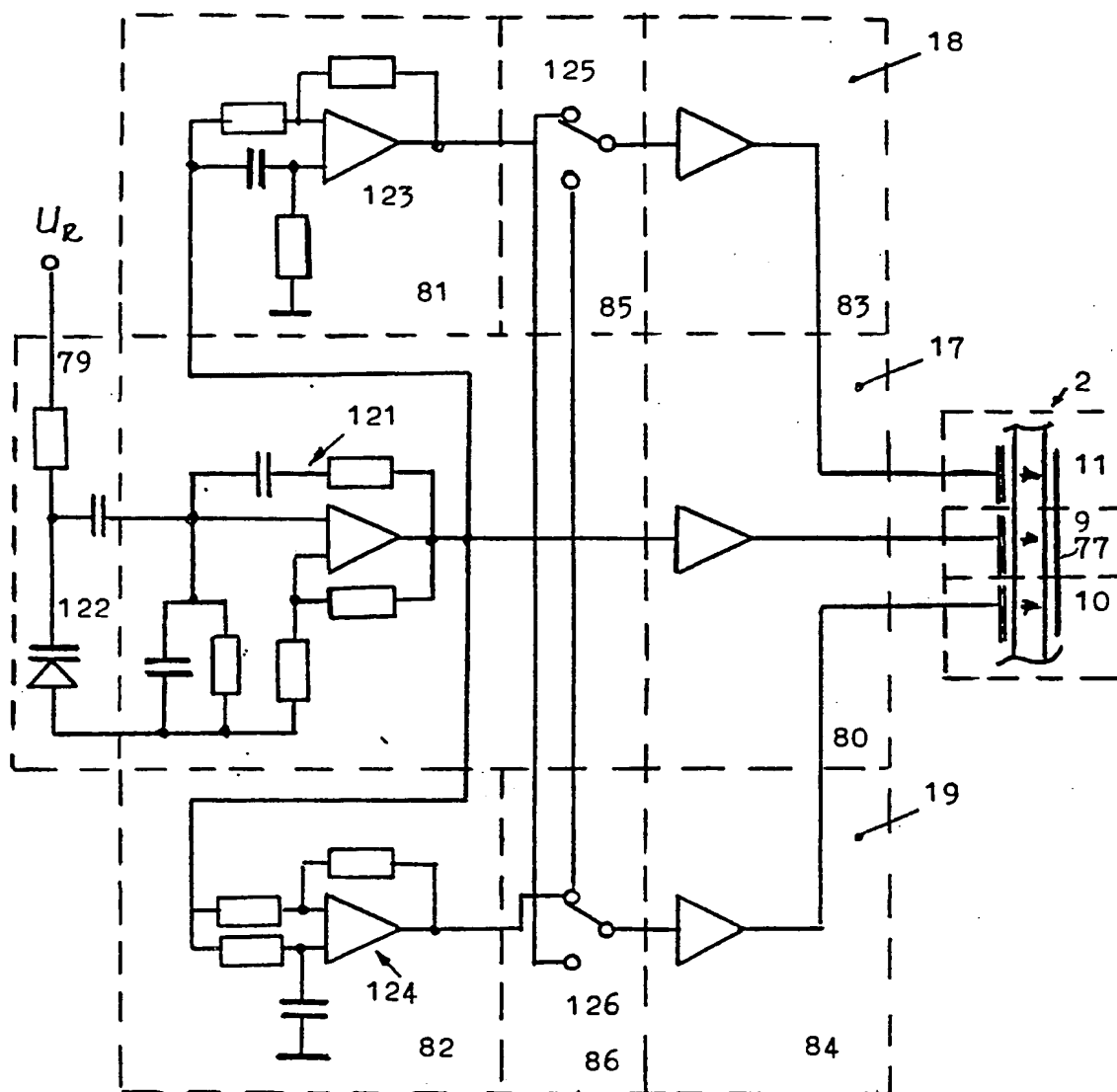


Fig. 37

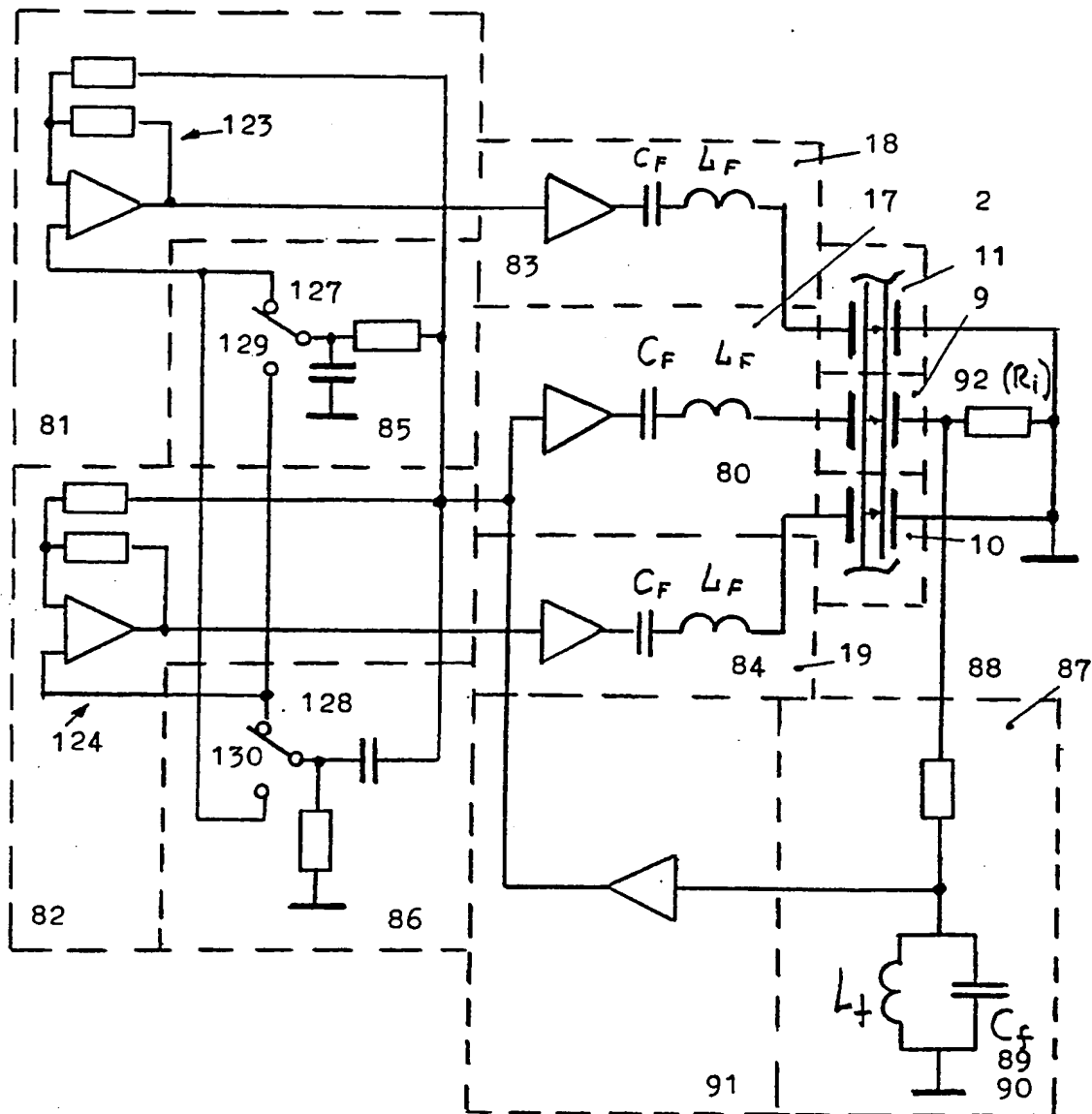


Fig. 38

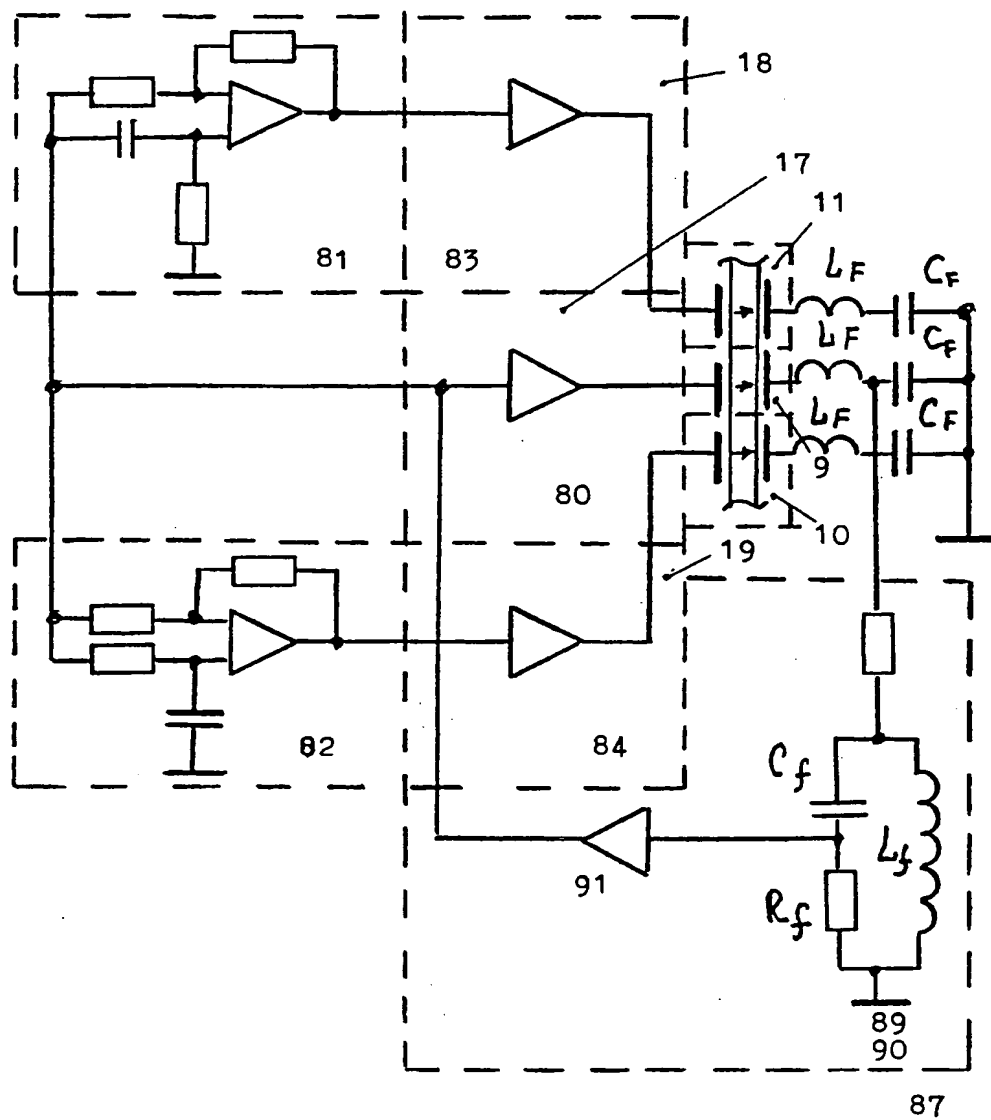


Fig.39

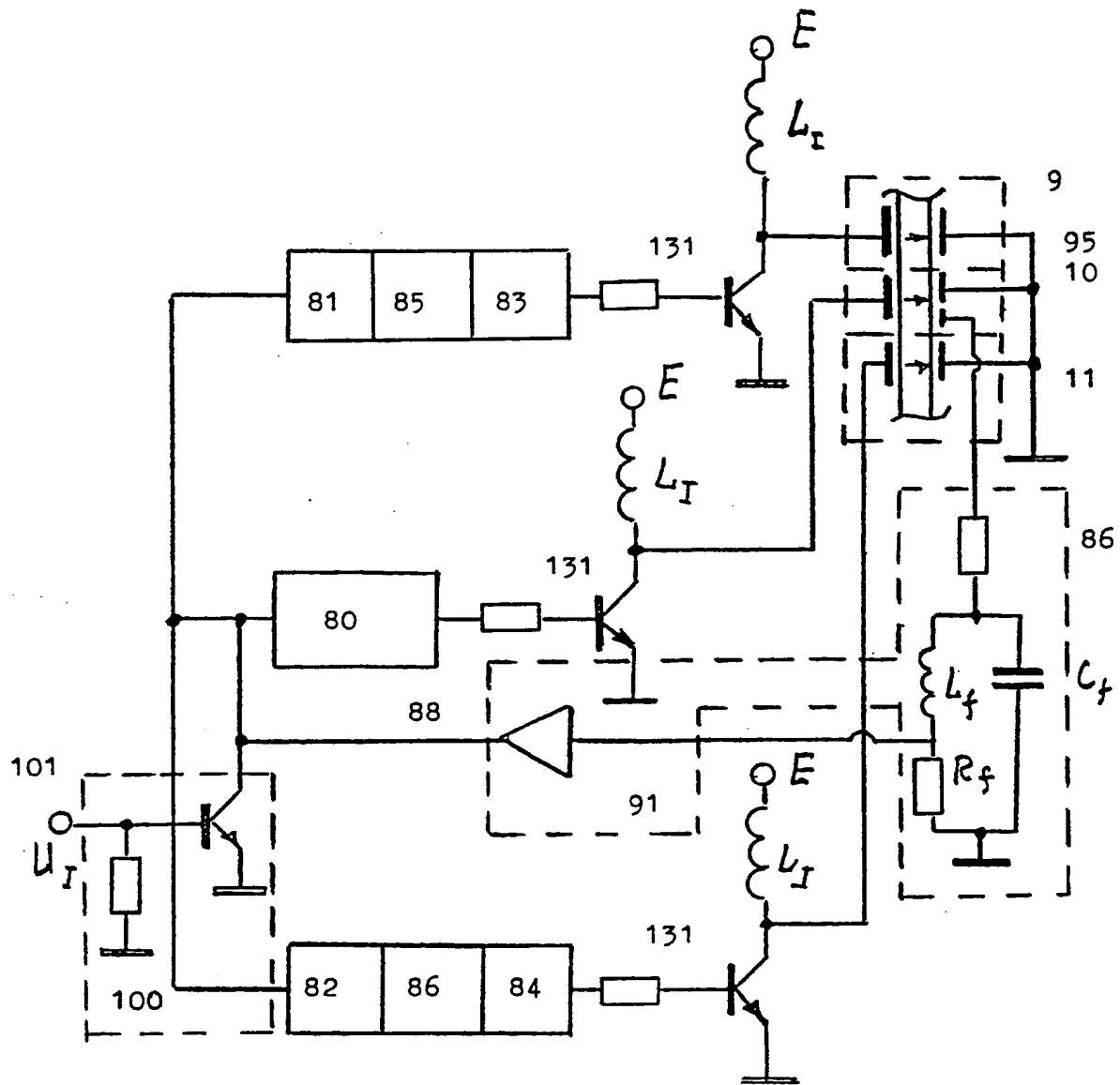


Fig. 40